

Untersuchung Grenzwerte TNZ

Abschlussbericht zu den Untersuchungen der Grenzwerte von Kontaktkräften beim Technischen Netzzugang (TNZ) Interaktion Stromabnehmer / Fahrleitung



Impressum



Autoren

Mathias Dürr, BLS
Michel Lötscher, BLS
Otto Wüest, SBB

Herausgeber

Allianz Fahrweg Normalspur, Bern, <https://allianz-fahrweg.ch>

Lizenz

Solange nichts anderes angegeben ist, sind die Inhalte dieses Dokuments unter der Lizenz [CC-BY 4.0](#) freigegeben. Für die Nutzung von Teilen, die nicht der Allianz Fahrweg Normalspur gehören, kann die Erlaubnis des jeweiligen Rechteinhabers notwendig sein.

Link

<https://www.allianz-fahrweg.ch/publications/PRJ-200-030-201.pdf>

Zitierung

Dürr, M., Lötscher, M., Wüest, O., *Abschlussbericht zu den Untersuchungen der Grenzwerte von Kontaktkräften beim Technischen Netzzugang Interaktion Stromabnehmer/Fahrleitung*, Allianz Fahrweg Normalspur, Bern, 2026, <https://www.allianz-fahrweg.ch/publications/PRJ-200-030-201.pdf>

Titelbild

Catenary by furbymama on pixabay.

Version

1.0.0

Interne Referenznummer

PRJ-200-030-201

Inhaltsverzeichnis

1	Management Summary	4
2	Ausgangslage & Ziel	4
3	Herangehensweise	5
4	Ergebnisse	5
5	Diskussion & Schlussfolgerungen	7
6	Literaturverzeichnis	8
7	Anhang	9

1 Management Summary

In Rahmen des Allianzprojektes «Untersuchung Grenzwerte TNZ» wurden zwei Teilprojekte durchgeführt. Das erste Teilprojekt analysiert Auswirkungen einer Harmonisierung der zulässigen Kontaktkraftgrenzwerte zwischen Lötschberg- und Gotthard-Basistunnel (LBT und GBT) hinsichtlich Betriebssicherheit, Fahrleitungsbeanspruchung und Lebensdauer. Das zweite Teilprojekt untersucht, ob sich die für die Zulassung relevanten Messgrößen auf Basis datenbasierter Methoden vorher-sagen lassen.

Die Ergebnisse zeigen, dass Unterschiede zwischen den Fahrleitungssystemen im LBT und GBT vorhanden sind, beide Systeme sind jedoch hinsichtlich ihrer dynamischen Eigenschaften grundsätz-lich vergleichbar. Weder die Auswertung von Messdaten noch die durchgeführten Simulationen und Verschleissbetrachtungen liefern Hinweise darauf, dass eine Harmonisierung der zulässigen mittleren Kontaktkraft F_m von heute 120 N im LBT auf 130 N (GBT) zu einer sicherheitsrelevanten Beeinträchtigung oder einer wesentlichen Reduktion der Lebensdauer der Fahrleitung führt.

Parallel dazu wurde mit der datenbasierten Methode gezeigt, dass die grundsätzliche Machbarkeit eines datenbasierten Prognoseansatzes für Kontaktkräfte gegeben ist.

2 Ausgangslage & Ziel

Für den Nachweis der Interaktion zwischen Stromabnehmer und Fahrleitung gelten bei Strecken im erweiterten Geschwindigkeitsbereich ($V_{\max} \geq 160$ km/h) besondere Anforderungen. Der vorliegende Bericht konzentriert sich auf die unterschiedlichen Anforderungen für den Lötschberg- und den Gott-hard-Basistunnel. Dies hat zur Folge, dass die Gesuchstellerin den Nachweis zur Einhaltung der Netzzugangsbedingungen für die jeweiligen Streckenabschnitte separat durch Testfahrten belegen muss.

Die zulassungsrelevanten Messgrößen der Interaktion Stromabnahme Fahrleitung bezüglich der Kontaktkraft sind:

- F_m Mittlere Kontaktkraft
- F_{\min} Minimale Kontaktkraft
- F_{\max} Maximale Kontaktkraft
- σ Standardabweichung der Kontaktkraft
- Lastausgleich der Schleifleiste bei Stromabnehmer mit zwei Schleifleisten

Vor diesem Hintergrund verfolgt das Projekt das Ziel, die Auswirkungen unterschiedlicher Kontakt-kraftgrenzwerte auf Betriebssicherheit, Fahrleitungsbeanspruchung und Lebensdauer der Infra-struktur zu untersuchen. Durch ein verbessertes Verständnis der mittel- und langfristigen Auswir-kungen sowie der unterschiedlichen Randbedingungen, wie Tunnelquerschnitt, Fahrleitungssystem und Fahrbahnsystem, soll die Grundlage für eine Harmonisierung der bestehenden Anforderungen geschaffen werden.

Daraus lassen sich folgende Projektziele ableiten:

- a. Kennen der Auswirkung bei Veränderung der Grenzwerte.
- b. Harmonisierung von Grenzwerten von bestehenden Anlagen (GBT / LBT).

- c. Mögliche Überführung der harmonisierten Grenzwerte in die Norm SN EN 50367 und Regelung R I-50088.
- d. Funktionale Anforderungen zu möglichen Ausschreibungen von Tunnelprojekten.

3 Herangehensweise

Zur Beantwortung der Fragestellung wurden zwei unabhängige Untersuchungen durchgeführt. Während die erste Studie die technischen und betrieblichen Auswirkungen einer Harmonisierung der Kontaktkraftgrenzwerte analysiert, untersucht die zweite Studie das Potenzial datenbasierter Methoden zur Unterstützung zukünftiger Zulassungs- und Nachweisverfahren.

Die Studie zur Harmonisierung der Kontaktkraftgrenzwerte umfasste:

- Einen Vergleich der technischen Eigenschaften der Fahrleitungsanlagen im LBT und GBT,
- die Auswertung bestehender Kontaktkraftmessungen verschiedener Fahrzeugtypen,
- Dynamiksimulationen der Stromabnehmer-Fahrleitungs-Interaktion,
- eine Literaturrecherche zu den Einflussgrößen des Fahrdrabtverschleisses,
- die Analyse realer Fahrdrabtrestdicken und Verschleissdaten aus beiden Tunneln.

Ziel dieser Untersuchung war die Beurteilung der Auswirkungen einer Anpassung der bestehenden Grenzwerte auf die Betriebssicherheit sowie auf die Lebensdauer und Beanspruchung der Fahrleitungsanlagen.

In der zweiten Studie wurden Messdaten des gezogenen Diagnosefahrzeugs (gDFZ) sowie des ETR 610 «Cisalpino» analysiert und mit Methoden des maschinellen Lernens ausgewertet. Ziel war die Entwicklung eines Modells, welches die Kontaktkräfte auf Basis vorhandener Strecken-, Fahrzeug- und Betriebsdaten prognostizieren kann. Damit sollte untersucht werden, ob datenbasierte Verfahren künftig einen Beitrag zur Bewertung der Interaktion leisten und dadurch Zulassungsverfahren unterstützen können.

4 Ergebnisse

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Untersuchung zusammenfassend dargestellt. Abschnitt 4.1 enthält die wesentlichen Erkenntnisse aus dem Abschlussbericht zur Harmonisierung der Kontaktkraftgrenzwerte [2]. In Abschnitt 4.2 wird die Untersuchung zur datenbasierten Prognose von Kontaktkräften zusammengefasst.

4.1 Harmonisierung Kontaktkräfte

Die Untersuchung zur Harmonisierung der Grenzwerte von Kontaktkräften beim Technischen Netzzugang – Interaktion Stromabnehmer/Fahrdrabt kommt zu folgenden Ergebnissen:

- Die analysierten Fahrleitungssysteme weisen trotz konstruktiver Unterschiede vergleichbare dynamische Eigenschaften auf.
- Die Auswertung von Messdaten und Simulationen zeigt keine Hinweise auf sicherheitsrelevante Nachteile bei einer Anhebung des zulässigen mittleren Kontaktkraftgrenzwertes im LBT auf das Niveau des GBT.

- **Die untersuchten Verschleissdaten und Fahrdratrestdicken zeigen keine Hinweise auf eine wesentliche Reduktion der Lebensdauer der Fahrleitungsanlagen infolge der betrachteten Grenzwertanpassung.**
- Die bestehenden Grenzwerte für die maximale Kontaktkraft bleiben unverändert bestehen.

Aus den Untersuchungen wurden folgende Empfehlungen abgeleitet:

- **Harmonisierung der zulässigen mittleren Kontaktkraftwerte unter Beibehaltung der zulässigen Maximalwerte.**
- Durchführung weiterer Dynamik-Messfahrten mit identischer Fahrzeugkonfiguration und gleicher Fahrgeschwindigkeit in beiden Tunneln.
- Durchführung von Langzeitmessungen der Fahrdratstärke in den identifizierten relevanten Problembereichen.
- Prüfung weiterer Möglichkeiten zur Harmonisierung der Zulassungsbedingungen im Bereich der Interaktion zwischen Stromabnehmer und Fahrdrat.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die in Kapitel 2 definierten Ergebnisse erbracht und die Projektziele somit erreicht wurden.

4.2 Datenbasierte Vorhersage

Die Untersuchung zur datenbasierten Prognose der zulassungsrelevanten Messgrößen der Interaktion Stromabnehmer Fahrleitung kommt zu folgendem Ergebnis:

- Die grundsätzliche Vorhersage der Kontaktkräfte mittels datenbasierter Modelle ist technisch möglich.
- Die entwickelten Modelle erreichen bei der Vorhersage der Kontaktkraft eine für einen Prototypen vielversprechende Genauigkeit.
- Die Integration zusätzlicher Fahrzeugdaten verbessert die Generalisierungsfähigkeit des Modells und erhöht die Qualität der Vorhersage.
- Die Vorhersage der statistischen Kenngrößen (F_m , F_{min} und F_{max}) stellt weiterhin eine Herausforderung dar und weist gegenüber der Vorhersage der Rohdaten eine höhere Unsicherheit auf.
- Die Qualität der Vorhersagen wird wesentlich durch die Verfügbarkeit, Qualität und Konsistenz der Eingangsdaten beeinflusst.

Aus der Untersuchung wurden folgende Empfehlungen abgeleitet:

- Erweiterung der Datengrundlage durch zusätzliche Fahrzeugtypen und weitere Messfahrten in Mehrfachtraktion.
- Verbesserung der Positionsgenauigkeit und Datenharmonisierung zwischen den verschiedenen Messsystemen.
- Weiterentwicklung der Modelle zur Verbesserung der Vorhersage von Extremwerten und statistischen Kennwerten.
- Prüfung möglicher Anwendungen datenbasierter Modelle zur Unterstützung zukünftiger Zulassungs- und Nachweisverfahren.

5 Diskussion & Schlussfolgerungen

Die Untersuchung zur Harmonisierung der Kontaktkraftgrenzwerte zeigt, dass der zulässige Grenzwert der mittleren Kontaktkraft F_m von heute 120 N auf 130 N angehoben werden kann, sofern die bestehenden Grenzwerte für die maximale und minimale Kontaktkraft beibehalten werden. Der Antrag zur Anpassung der I-50088 wurde bereits initiiert.

Eine weitere interessante Erkenntnis betrifft den Fahrdrachtverschleiss (siehe [2] Kapitel 7.4). Die Auswertung der vorhandenen Messdaten zeigt, dass die erwartete Lebensdauer an typischen Verschleissstellen mehrere Jahrzehnte bis teilweise deutlich über 200 Jahre beträgt. Diese Erkenntnis sollte in den kommenden Jahren mittels der Messkampagnen überprüft und beobachtet werden. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse sind bei zukünftigen Instandhaltungsprojekten im LBT und GBT zu berücksichtigen.

Die Untersuchung zur datenbasierten Vorhersage von Kontaktkräften konnte die grundsätzliche technische Machbarkeit eines entsprechenden Modells nachweisen. Die erzielten Ergebnisse zeigen, dass Kontaktkräfte auf Basis vorhandener Messdaten mit einer vielversprechenden Genauigkeit prognostiziert werden können (siehe [1] Kapitel 5.4).

Der Bericht zeigt jedoch auch, dass die Datenaufbereitung mit erheblichem Aufwand verbunden ist, insbesondere wenn Daten von unterschiedlichen Messsystemen vorliegen. Voraussetzung hierfür sind qualitativ hochwertige Messdaten sowie möglichst vergleichbare Randbedingungen hinsichtlich der eingesetzten Messsysteme. Zudem stellt sich die Frage, an welcher Stelle im Zulassungsprozess ein konkreter Mehrwert erzielt werden kann. Aus heutiger Sicht wird das grösste Potenzial in einer direkten Unterstützung der Messfahrten gesehen. Voraussetzung dafür wäre, dass die erfassten Messdaten unmittelbar dem Prognosemodell zur Verfügung gestellt werden und die Ergebnisse in Echtzeit ausgewertet werden können. Dadurch würden Messfahrten dynamischer gestaltet werden. Anstelle eines vollständig vorgegebenen Messprogramms könnten zusätzliche Geschwindigkeitsstufen oder Streckenabschnitte gezielt auf Basis der Prognosen untersucht werden.

6 Literaturverzeichnis

[1] Florian Burri, Version 2.0 (2025). CSEM Referenznummer: 661-IN.2423, 661-IN.2561 «Panto-Force». Alpnach Dorf: csem

[2] Enrico Brandes, Version (2026). IFB-Bericht Nr. 2025-712140-1020.0 «Harmonisierung Kontaktkräfte». Dresden: Institut für Bahntechnik GmbH

7 Anhang

IFB-Bericht Nr. 2025-712140-1020.0

**Untersuchung zur Harmonisierung
der Grenzwerte von Kontaktkräften
beim Technischen Netzzugang
Interaktion
Stromabnehmer/Fahrdraht**

Kurztitel: „Harmonisierung Kontaktkräfte“

im Auftrag
Allianz Fahrweg Normalspur
Bern

Dresden, 01.April 2026

Unsere Firmenanschrift:

IFB Institut für Bahntechnik GmbH
Niederlassung Dresden
Wiener Str. 114-116
D-01219 Dresden

Telefon: +49 351 87759 0
Telefax: +49 351 87759 90
E-Mail: ifb-dresden@bahntechnik.de

Im Unterauftrag

Technische Universität Dresden
Professur Elektrische Bahnen
Hettnerstraße 3
D-01069 Dresden

Projektleiter:

Dipl.-Ing. Enrico Brandes
Tel: +49 351 87759 61

Bearbeiter:

Prof. Dr.-Ing. Arnd Stephan
Tel: +49 351 463-36730

M.Sc. Julius Schramm
Tel: +49 351 87759 49

Dipl.-Ing. Jochen Bauer
Tel: +49 351 463-36616

Revisionsverlauf

Datum	Revision	Kapitel	Beschreibung
01.04.2026	-	Alle	Neuerstellung

Inhalt

1	Veranlassung	11
1.1	Motivation und Zielstellung	11
1.2	Aufbau der Studie	11
1.3	Verwendete Dokumente	12
2	Netzzugang und Systemvergleich für LBT und GBT	14
2.1	Kontaktkraftgrenzwerte der Interaktion Stromabnehmer/Fahrleitung	14
2.2	Vergleich der Tunnelstrecken	17
2.2.1	Gotthard-Basistunnel (GBT)	17
2.2.2	Lötschberg-Basistunnel (LBT)	18
2.3	Technische Analyse der Oberleitungstypen	20
2.3.1	Konstruktive Parameter	20
2.3.2	Dynamische Kennwerte	23
3	Auswertung von Kraftmessungen am Stromabnehmer	27
3.1	Methodik und verwendete Daten	27
3.2	Aerodynamische Kraftkomponente am Stromabnehmer	28
3.3	Charakteristika im Kontaktkraftverlauf	33
3.4	Statistische Kontaktkraftwerte (gDFZ)	36
4	Dynamiksimulation	41
4.1	Modellbildung, Parametrierung und Validierung	41
4.2	Randbedingungen und untersuchte Szenarien	41
4.3	Ergebnisse	42
5	Literaturrecherche zum Verschleiß von Fahrdrähten	49
5.1	Einflussgrößen und Erfahrungen aus Arbeiten an TU Dresden	49
5.2	Allgemeine Literatur im Kontext von Fahrdrähten	54
5.3	Untersuchungen unter Betriebsbedingungen	59
5.4	Untersuchungen unter Laborbedingungen	65
5.5	Zusammenfassung der Ergebnisse der Literaturrecherche	69
6	Betrachtung von Fahrdrähtrestdicken	72
6.1	Fahrdrähtrestdicken im GBT	72
6.1.1	Grafische Darstellung der Fahrdrähtrestdicken im GBT	72
6.1.2	Tendenzielle Veränderung des Fahrdrähtquerschnitts im GBT	74
6.1.3	Kontaktkraftmessungen und Fahrdrähtrestdicken des GBT	80
6.2	Fahrdrähtrestdicken im LBT	92
6.2.1	Grafische Darstellung der Fahrdrähtrestdicken im LBT	92
6.2.2	Tendenzielle Veränderung des Fahrdrähtquerschnitts im LBT	94
7	Zusammenfassung	100
7.1	Harmonisierung von Kontaktkraftgrenzwerten	100
7.2	Konstruktive Parameter und dynamische Kennwerte der Oberleitungen	100
7.3	Kontaktkraftmessung und Dynamiksimulation	102
7.4	Fahrdrähtverschleiß unter Krafteinwirkung	104
7.5	Handlungsempfehlungen	105
8	Literaturverzeichnis	106

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Normen.....	12
Tabelle 2:	Bereitgestellte Dokumente.....	12
Tabelle 3:	Grenzwerte der Kontaktkraft in GBT und LBT [D2].....	16
Tabelle 4:	Konstruktive Systemparameter der Oberleitungsanlagen im GBT und LBT [D1] [D5].....	22
Tabelle 5:	Vergleich berechneter dynamischer Oberleitungskenngrößen für LBT, GBT und Re 250 (DB)*	26
Tabelle 6:	Übersicht Fahrt- und Stromabnehmerrichtungen gDFZ.....	37
Tabelle 6:	Ergebnisse Frankfurt – Köln, entnommen aus [22].....	59
Tabelle 7:	Ergebnisse Göttingen – Hannover, entnommen aus [22]	60
Tabelle 8:	Ergebnisse Nürnberg – Ingolstadt, entnommen aus [22].....	60
Tabelle 10:	Statistische Parameter und Lichtbogenentstehung der Messungen auf einer Hochgeschwindigkeitsstrecke, entnommen aus [22]	62

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Kräfte am Stromabnehmer [1]	15
Abbildung 2:	Übersichtskarte Gotthard-Basistunnel [2]	17
Abbildung 3:	Querschnitt des GBT [3]	18
Abbildung 4:	Übersichtskarte Lötschberg-Basistunnel [D1].....	19
Abbildung 5:	Querschnitte des LBT [8]	20
Abbildung 6:	Schematische Darstellung des Kettenwerk im GBT [D5].....	21
Abbildung 7:	Schematische Darstellung des Kettenwerk im LBT (EBV 4) [7].....	21
Abbildung 8:	Aufbau des gezogenen Diagnosefahrzeuges [D7]	28
Abbildung 9:	Ermittlung der aerodynamischen Kraftkomponente $F_{\text{seil}} - F_{\text{stat}}$	30
Abbildung 10:	Vergleich aerodynamischer Kraftkomponenten verschiedener Fahrzeug- und Stromabnehmerkonfigurationen	31
Abbildung 11:	Kontaktkraftmessung RABe 501 (Einfachtraktion), LBT	32
Abbildung 12:	Kontaktkraftmessung RABe 501 (Einfachtraktion), GBT	32
Abbildung 13:	Kontaktkraftmessung RABe 502 (Doppeltraktion)	33
Abbildung 14:	Kontaktkraftverläufe im LBT km 40,5-41,5 für das gDFZ mit den Gangarten P1 Spieß und P2 Knie für verschiedene Geschwindigkeiten, Fahrtrichtung Frutigen nach Visp.....	34
Abbildung 15:	Kontaktkraftverläufe im LBT an der Überlappung für das gDFZ mit den Gangarten P1 Spieß und P2 Knie für verschiedene Geschwindigkeiten.....	35
Abbildung 16:	Kontaktkraftverläufe im LBT am Festpunkt für das gDFZ mit den Gangarten P1 Spieß und P2 Knie für verschiedene Geschwindigkeiten.....	36
Abbildung 17:	Vergleich statistischer Kontaktkraftwerte für das gDFZ bei einer Geschwindigkeit von 200 km/h im GBT und LBT	38
Abbildung 18:	Darstellung von maximaler zu mittlerer Kontaktkraft.....	39
Abbildung 19:	Darstellung von Standardabweichung zu mittlerer Kontaktkraft	40

Abbildung 20:Drei-Massen-Feder-Dämpfermodell RM 350/355 SBB.....	41
Abbildung 21:Vergleich der maximalen Kontaktkraft F_{\max}	43
Abbildung 22:Vergleich der minimalen Kontaktkraft F_{\min}	44
Abbildung 23:Vergleich der Standardabweichung der Kontaktkraft σ	45
Abbildung 24:Vergleich des maximalen Fahrdrachthubs u_{\max}	46
Abbildung 25:Vergleich der Kontaktkräfte als Violinendiagramm	47
Abbildung 26:Vergleich der Fahrdrachthübe als Violinendiagramm	48
Abbildung 27:Einflüsse auf den Fahrdrachtverschleiß, entnommen aus [13].....	49
Abbildung 28:Fahrdrachtverschleiß in Abhängigkeit der Kontaktkraft, entnommen aus [13].....	50
Abbildung 29:Jährliche Verschleißraten im Nahverkehr, aus [14]	51
Abbildung 30:Verschleiß an Quersfeldisolator und Streckentrenner, aus [14]	52
Abbildung 31:Verschleiß über Stromabnehmerdurchgänge, aus [14]	52
Abbildung 32:Abgenutzter Fahrdrachtquerschnitt auf der Strecke Köln-Neuss, entnommen aus [17].....	53
Abbildung 33:Auf einem Prüfstand ermittelte relative Verschleißraten, entnommen aus [1].....	57
Abbildung 34:Simulationsergebnisse für Re 200, entnommen aus [1]	57
Abbildung 35:Verschleißraten bei verschiedenen Kontaktkräften, Geschwindigkeiten und Fahrdrachtmaterialien, entnommen aus [20] 58	
Abbildung 36:Jährlicher Fahrdrachtverschleiß in Abhängigkeit der Zugdichte bei unterschiedlichen Schleifleisten, entnommen aus [21]	61
Abbildung 37:Histogramme der Kontaktkraft der Messungen 1 bis 8, aus [22]	63
Abbildung 38:Histogramme der Kontaktkraft der Messungen 9 bis 16, aus [22]	64
Abbildung 39:Verschleiß von Fahrdrächten aus CuMg 0,4 und CuAg 0,1, aus [24] 65	
Abbildung 40:Verschleißraten im Labor und unter realen Bedingungen, aus [25]....	66
Abbildung 41:Experimente zu Lichtbogenentstehung bei unterschiedlicher Kontaktkraft und Geschwindigkeit, entnommen aus [25].....	67
Abbildung 42:Fahrdrachtverschleiß bei verschiedenen Materialien der Kontaktstreifen, entnommen aus [25]	67
Abbildung 43:Zusammenhang von Kontaktstreifenverschleiß und Fahrdrachtverschleiß, entnommen aus [25]	68
Abbildung 44:Ermittelte Fahrdrachtrestdicken im GBT zwischen 2022 und 2025	73
Abbildung 45:Restdicken der Messungen 2024-12-07 und 2025-08-23 im GBT.....	73
Abbildung 46:Fahrdrachtrestdicken in einem Abschnitt des GBT	74
Abbildung 47:Verschleiß des Querschnitts eines Rillenfahrdrahtes der Ausführung AC, entnommen aus [1].....	74
Abbildung 48:Zunahme der Verschleißfläche mit steigender Anzahl an Strom- abnehmerdurchgängen (Annahme: 5 Stromabnehmerdurchgänge pro Stunde).....	76
Abbildung 49:Sinken der Verschleißfläche mit steigender Anzahl an Strom- abnehmerdurchgängen (Annahme: 5 Stromabnehmerdurchgänge pro Stunde).....	77
Abbildung 50:Histogramm der Verschleißraten im GBT (Annahme: 3 Strom- abnehmerdurchgänge pro Stunde).....	78

Abbildung 51:Histogramm der Verschleißraten im GBT (Annahme: 5 Stromabnehmerdurchgänge pro Stunde).....	78
Abbildung 52:Histogramm der Verschleißraten im GBT (Annahme: 7 Stromabnehmerdurchgänge pro Stunde).....	79
Abbildung 53:Vergleich Linienkilometer 220,4 bis 221,2 und Linienkilometer 221,2 bis 222 im GBT.....	81
Abbildung 54:Messungen mit Stromabnehmer im Kniegang r0, r1, r2 und r3: Histogramme der Kontaktkraft in den Linienkilometerbereichen 220,4 bis 221,2 und 221,2 bis 222.....	83
Abbildung 55:Messungen mit Stromabnehmer im Kniegang r4, r5, r6 und r7: Histogramme der Kontaktkraft in den Linienkilometerbereichen 220,4 bis 221,2 und 221,2 bis 222.....	84
Abbildung 56:Messungen mit Stromabnehmer im Spiessgang r0, r1, r2 und r3: Histogramme der Kontaktkraft in den Linienkilometerbereichen 220,4 bis 221,2 und 221,2 bis 222.....	85
Abbildung 57:Messungen mit Stromabnehmer im Spiessgang r4, r5, r6 und r7: Histogramme der Kontaktkraft in den Linienkilometerbereichen 220,4 bis 221,2 und 221,2 bis 222.....	86
Abbildung 58:Vergleich Linienkilometer 232,5 bis 232,9 und Linienkilometer 232,9 bis 233,3 im GBT.....	87
Abbildung 59:Messungen mit Stromabnehmer im Kniegang r0, r1, r2 und r3: Histogramme der Kontaktkraft in den Linienkilometerbereichen 232,5 bis 232,9 und 232,9 bis 233,3.....	88
Abbildung 60:Messungen mit Stromabnehmer im Kniegang r4, r5, r6 und r7: Histogramme der Kontaktkraft in den Linienkilometerbereichen 232,5 bis 232,9 und 232,9 bis 233,3.....	89
Abbildung 61:Messungen mit Stromabnehmer im Spiessgang r0, r1, r2 und r3: Histogramme der Kontaktkraft in den Linienkilometerbereichen 232,5 bis 232,9 und 232,9 bis 233,3.....	90
Abbildung 62:Messungen mit Stromabnehmer im Spiessgang r4, r5, r6 und r7: Histogramme der Kontaktkraft in den Linienkilometerbereichen 232,5 bis 232,9 und 232,9 bis 233,3.....	91
Abbildung 63:Fahrdrhtrestdicken im LBT (Linie 330).....	92
Abbildung 64:Ausschnitt der Fahrdrhtrestdicken im LBT (Linie 330).....	93
Abbildung 65:Ausschnitt der Fahrdrhtrestdicken im LBT (Linie 330) bei Linienkilometer 18,7.....	93
Abbildung 66:Zunahme der Verschleißfläche mit steigender Anzahl an Stromabnehmerdurchgängen (Annahme: 5 Stromabnehmerdurchgänge pro Stunde).....	94
Abbildung 67:Histogramm der Verschleißraten im LBT auf Basis der Messungen der Jahre 2021 bis 2023, Annahme: 5 Stromabnehmerdurchgänge pro Stunde.....	95
Abbildung 68:Histogramm der Verschleißraten im LBT auf Basis der Messungen der Jahre 2021 bis 2023, Annahme: 3 Stromabnehmerdurchgänge pro Stunde.....	96
Abbildung 69:Histogramm der Verschleißraten im LBT auf Basis der Messungen der Jahre 2021 bis 2023, Annahme: 7 Stromabnehmerdurchgänge pro Stunde.....	96

Abbildung 70: Histogramm der Verschleißraten im LBT auf Basis der Messungen
der Jahre 2021 bis 2024, Annahme: 5 Stromabnehmerdurchgänge
pro Stunde 97

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bezeichnung
BAV	Bundesamt für Verkehr
EBV	Eisenbahnverordnung
FD	Fahrdraht
FL	Fahrleitung
GBT	Gotthard-Basistunnel
gDFZ	gezogenes Diagnosefahrzeug
ISB	Infrastrukturbetreiber
LBT	Lötschberg-Basistunnel
NEAT	Neue Eisenbahn-Alpentransversale
OL	Oberleitung
OLA	Oberleitungsanlage
TEN	Transeuropäisches Netz
TS	Tragseil

Symbolverzeichnis

Symbol	Einheit	Bezeichnung
\bar{c}	m/s	Mittlere Wellenausbreitungsgeschwindigkeit
A_{FD}	mm ²	Fahrdrahtquerschnitt
c_{FD}	m/s	Wellenausbreitungsgeschwindigkeit Fahrdraht
c_p	m/s	Wellenausbreitungsgeschwindigkeit
e	mm/N	Elastizität
e_{max}	mm/N	Maximale Elastizität
e_{min}	mm/N	Minimale Elastizität
F_{aero}	N	Aerodynamische Kraft
F_C	N	Kontaktkraft
F_{dyn}	N	Dynamische Kontaktkraft
F_m	N	Mittlere Kontaktkraft
F_{stat}	N	Statische Kontaktkraft
γ_A	-	Verstärkungsfaktor
H_0	N	Zugkraft Draht
H_{FD}	N	Zugkraft Fahrdraht
H_{TS}	N	Zugkraft Tragseil
k_e	-	Faktor für Kettenwerk-Elastizität
l	m	Stützpunktabstand
l_1	m	Abstand Stützpunkt zum ersten Hänger
L_{SA}	M	Abstand zwischen gehobenen Stromabnehmern
m'_{TS}	kg/m	Längenbezogene Masse Tragseil
m'_{FD}	kg/m	Längenbezogene Masse Fahrdraht
r	-	Reflexionsfaktor
U	%	Ungleichförmigkeit
V	m/s	Fahrgeschwindigkeit
v_a	m/s	Grenzgeschwindigkeit
α_D	-	Dopplerfaktor
ν_1	Hz	Erste Grundfrequenz der Eigenschwingung (antimetrische Schwingung)
ν_2	Hz	Zweite Grundfrequenz der Eigenschwingung (symmetrische Schwingung)
ρ_{FD}	kg/m ³	Spezifische Masse Fahrdraht
σ_{FD}	N/mm ²	Längsspannung Fahrdraht
σ_{max}	N	Maximale Standardabweichung Kontaktkraft

1 Veranlassung

1.1 Motivation und Zielstellung

Schienenfahrzeuge, die in der Schweiz verkehren, benötigen eine Betriebsbewilligung nach Art. 8 Abs. 2 EBV. Die Infrastrukturbetreiber (ISB) erlassen Netzzugangsbedingungen für den sicheren Betrieb auf ihrem Netz. Die Fahrzeuge der Verkehrsunternehmen, die das Netz befahren wollen, müssen die darin definierten Grenzwerte sowie weitere Normen und Vorschriften einhalten. Dem Bundesamt für Verkehr (BAV) muss dies in Form eines Sicherheitsnachweises dargelegt werden. Die Sicherheitsnachweise basieren auf Berechnungen und Testfahrten.

Der **Lötschberg- (LBT)** sowie der **Gotthard-Basistunnel (GBT)** sind Teil der Neuen Eisenbahn-Alpentransversale (NEAT), die den Verkehr in Nord-Süd-Richtung der Schweiz verbessert. Die Tunnel sind Bestandteil des Transeuropäischen Netzes (TEN) auf der Relation Rotterdam-Genua. Sie dienen dem Personen- und Güterverkehr. Als Infrastrukturbetreiber (ISB) sind einerseits die BLS AG für den LBT sowie die SBB AG für den GBT verantwortlich.

Im Teilsystem der dynamischen Interaktion zwischen Stromabnehmer und Fahrleitung der Netzzugangsbedingungen haben beide ISB unterschiedliche **Kontaktkraftgrenzwerte** definiert. Weiterhin sind Hersteller verpflichtet, deren Fahrzeuge in beiden Tunneln eingesetzt werden sollen, die Einhaltung der Grenzwerte in beiden Tunneln separat nachzuweisen. Die getrennten Zulassungsprozesse sind in Summe sehr zeitintensiv und binden personelle und materielle Ressourcen.

Aus Sicht der ISB ergibt sich daher folgerichtig die Fragestellung, ob und unter welchen Randbedingungen eine Harmonisierung der bestehenden Prozesse und Bedingungen des Netzzugangs möglich ist.

Zu diesem Zweck initiierte die Allianz Fahrweg die vorliegende Untersuchung, deren Fragestellung wie folgt lautet:

Welche Auswirkung hat eine Anhebung der Kontaktkraftgrenzwerte des LBT auf die des GBT hinsichtlich Betriebssicherheit und Lebensdauer der Fahrleitung?

Hieraus leiten sich die folgenden **Analyseziele** ab:

1. Ein vollständiger Vergleich der technischen Eigenschaften der Fahrleitungen LBT und GBT ist durchgeführt und dokumentiert.
2. Die Risiken der Interaktion zwischen Stromabnehmer und Fahrleitung sind auf Basis von Dynamiksimulationen fundiert bewertet.
3. Die Auswirkungen erhöhter Kontaktkraftgrenzwerte auf Verschleiß und Lebensdauer der Fahrleitung sind belastbar ermittelt.

1.2 Aufbau der Studie

Kapitel 2 erläutert die Bildung der Kontaktkraft an der Schnittstelle zwischen Stromabnehmer und Fahrdrabt und listet die aktuellen Kontaktkraftgrenzwerte aus den technischen Netzzugangsbedingungen für GBT und LBT auf. Anschließend werden konstruktive Parameter und dynamische Kennwerte der Oberleitungen in GBT und LBT systematisch miteinander verglichen.

In Kapitel 3 erfolgt eine umfassende Auswertung vorhandener Messberichte verschiedener Zugkompositionen. Diese Analyse umfassen statistische Kennwerte, aerodynamische Kraftmessungen sowie die Betrachtung transienter Kraftverläufe.

Zum erweiterten Vergleich des dynamischen Verhaltens der Oberleitungen in GBT und LBT werden in Kapitel 4 Dynamiksimulationen durchgeführt und ausgewertet. Sie dienen der Differenzialanalyse zwischen den Oberleitungsanlagen als auch der Möglichkeit der zu harmonisierenden Kontaktkraftgrenzwerte.

Kapitel 5 fasst den aktuellen Stand der Fachliteratur bezüglich des Verschleißes von Fahrdrähten zusammen. Es werden umfassend Einflussgrößen und Erkenntnisse aus Messungen unter Real- und Laborbedingungen zum Thema dargelegt. Ergänzend werden in Kapitel 6 vorhandene Messwerte zu Fahrdrähtrestdicken in beiden Tunneln analysiert und statistisch ausgewertet. Es werden Verschleißraten ermittelt und beurteilt, ob eine Grenzwertanpassung zu einer relevanten Reduzierung der Lebensdauererwartung der Oberleitungsanlagen führen kann.

Kapitel 7 fasst die wesentlichen Erkenntnisse der Studie zusammen und schließt mit konkreten Handlungsempfehlungen für das weitere Vorgehen.

1.3 Verwendete Dokumente

Tabelle 1: Normen

Norm	Titel
EN 50119:2020	Bahnanwendungen - Ortsfeste Anlagen - Oberleitungen für die elektrische Zugförderung
EN 50318:2018 + A1:2022	Bahnanwendungen - Stromabnahmesysteme - Validierung von Simulationssystemen für das dynamische Zusammenwirken zwischen Dachstromabnehmer und Oberleitung
EN 50367:2020 + A1:2022	Bahnanwendungen - Ortsfeste Anlagen und Fahrzeuge - Kriterien zur Erreichung der technischen Kompatibilität zwischen Dachstromabnehmern und Oberleitung

Tabelle 2: Bereitgestellte Dokumente

- [D1] „Technischer Bericht (Teil 1 von 4) Ausführungsprojekt“, Siemens und Kummler+Matter, 2007
- [D2] „I-50088 Technischer Netzzugang: Infrastrukturanforderungen Interaktion Stromabnehmer/Fahrleitung.“, SBB AG
- [D3] „Lötschberg-Basisstrecke (LBS) Wengi-Ey (exkl.) / Frutigen (exkl.) – St. German (exkl.) Technische Bedingungen der Strecke und Anforderungen an das Rollmaterial“, BLS AG, 2018
- [D4] „R 250 GBT Kettenwerk Tunnel“, ARGE 16,7 Hz Transtec Gotthard, 2011
- [D5] „Hauptdaten des eingesetzten Fahrleitungssystems“, SBB AG
- [D6] „Dynamische Simulation der Befahrungsgüte“, Beilage 3 zum technischen Bericht, Siemens und Kummler+Matter, 2006
- [D7] „Abschlussbericht Interaktion Stromabnehmer/Fahrleitung gezogenes Diagnosefahrzeug“, mit zugehörigen Rohdaten, SBB AG, 2021

- [D8] „Interaktion Stromabnehmer/Fahrleitung bei Fahrten mit dem SBB gDFZ auf dem Normalspur-Schienennetz der SBB Infrastruktur Unbedenklichkeitserklärung UE010399b“, SBB AG, 2022
- [D9] „EC250 (RABe 501) Kontaktkraftmessung Richard Stromabnehmer RM354-214 bis 220 km/h“, Prose AG, 2018
- [D10] „Interaktion Stromabnehmer/Fahrleitung bei Fahrten mit dem SBB RABe 501 Giruno (EC250) in Einzel- und Doppeltraktion auf dem Normalspur-Schienennetz der BLS Netz AG als Ergänzung zur UE010378d der SBB.“ BLS Netz AG, 2020
- [D11] „Interaktion Stromabnehmer/Fahrleitung bei Fahrten mit dem SBB RABe 501 Giruno (EC250) in Einzel- und Doppeltraktion auf dem Normalspur-Schienennetz der SBB Infrastruktur Unbedenklichkeitserklärung UE010378d“, SBB AG, 2020
- [D12] „TWINDEXX RABe 502 Kontaktkraftmessungen CBT, GBT, LBT, NBS“, Prose AG, 2020
- [D13] „Kontaktkraftmessungen am Stromabnehmer Faiveley AX 15 kV auf der Re 460-072 und Schunk WBL 85 auf der Re 460-007 in Doppeltraktion im LBT mit Vmax 220 km/h“, SBB AG, 2009
- [D14] Excel-Datei zum Tunneltragwerk im GBT, SBB AG
- [D15] Hängerberechnungen im LBT als Ausführungsplanung, BLS AlpTransit Lötschberg, 2007
- [D16] Querschnittszeichnungen LBT, BLS AlpTransit Lötschberg, 2005
- [D17] „Drei Massen-Feder-Dämpfermodell des Stromabnehmers, Typ RM 350/355“, Furrer+Frey AG
- [D18] „Circulation sous caténaire R125 du réseau CFF de locomotives Re460 en UM2.“, SNCF, 2010
- [D19] Massenmodell WBL 85 SBB und Lok 460, SNCF, 2010
- [D20] „Simulation des dynamischen Zusammenwirkens zwischen Stromabnehmer und Oberleitung mit CATMOS® DSA200.701 an Schweizer Oberleitungen“, Balfour Beatty Rail, 2011
- [D21] Excel-Datei mit Verschleißmessungen im GBT, SBB AG
- [D22] Excel-Datei mit Verschleißmessungen im LBT, BLS Netz AG

2 Netzzugang und Systemvergleich für LBT und GBT

2.1 Kontaktkraftgrenzwerte der Interaktion Stromabnehmer/Fahrleitung

Zunächst wird im nachfolgenden Kapitel der Begriff der Kontaktkraft in der Schnittstelle zwischen Stromabnehmer und Fahrdrabt erläutert. Dabei wird kurz auf die mechanischen Bestandteile und physikalischen Wirkmechanismen eingegangen. Diese Darstellung dient als Grundlage für das Verständnis der nachfolgenden Inhalte der Untersuchung. Abschließend werden die relevanten Kontaktkraftgrenzwerte vorgestellt, die im Rahmen einer Harmonisierung betrachtet werden müssen.

Nach EN 50367 ist die Kontaktkraft F_C , „die vertikale Kraft, die von einem Dachstromabnehmer auf den Fahrdrabt [...] aufgebracht wird“. Weiterhin ist sie „die Summe der Kräfte an allen Kontaktpunkten eines Dachstromabnehmers“. Sie lässt sich in eine statische, aerodynamische und fahrdynamische Anpresskraft unterteilen (vgl. Formel (1)). Die Orte der Kraftwirkungen am Stromabnehmer sind in Abbildung 1 skizziert.

$$F_C = F_{stat} + F_{aero} + F_{Reibung} + F_{dyn} \quad (1)$$

Die **statische Anpresskraft** wird durch einen druckluftbetriebenen Hubantrieb erzeugt und soll möglichst konstant im Bereich von 60 bis 90 N (für Gleichstrombahnen bis 120 N) ausgeübt werden. Man ermittelt diese durch Messung im Stand des Fahrzeuges.

Fügt man zur statischen Anpresskraft noch die geschwindigkeitsabhängigen Fahrtwindanteile hinzu, erhält man die **aerodynamische Anpresskraft**. Diese vertikal wirkende Kraft wird ohne Berührung des Fahrdrabtes mit speziellen Messvorrichtungen (Fadenkraft) gemessen. Während der Inbetriebnahme von Zügen versucht man diese Kraftkomponente durch sogenannte Windleitbleche an der Wippe zu beeinflussen, um die gewünschte Kraftwirkung über den gesamten Geschwindigkeitsbereich zu erzielen.

Stromabnehmer und Oberleitung interagieren mechanisch in einem schwingungsfähigen System miteinander, wodurch weitere fahrdynamische Kraftanteile wirken. Die resultierende Kraft wird als **fahrdynamische Anpresskraft** bezeichnet. Deren Höhe wird beeinflusst durch konstruktive und dynamische Eigenschaften der Oberleitung, wie Elastizität und Ungleichförmigkeit, mechanische Parameter des Stromabnehmers, wie Feder- und Dämpfungswerte, oder dem Fahrverhalten des Fahrzeuges wie Wanken oder Fahrzeuglauf in Abhängigkeit der Gleislage. Ebenso haben die Anzahl und der Abstand der Stromabnehmer einen Einfluss (Mehrfachstromabnehmerbetrieb). Weiterhin wirkt in den Gelenken des Stromabnehmers Reibung, die dessen Auf- und Abwärtsbewegungen entgegenwirkt.

Um die Güte der Stromabnahmequalität sicherzustellen, muss sich die Kontaktkraft innerhalb festgelegter Grenzen bewegen. Denn zu geringe Kontaktkräfte erhöhen die Wahrscheinlichkeit für Kontaktabriss und Lichtbögen, wohingegen zu hohe Kontaktkräfte zu übermäßigem Verschleiß der Stromabnehmerschleifleisten sowie des Fahrdrabtes führen können.

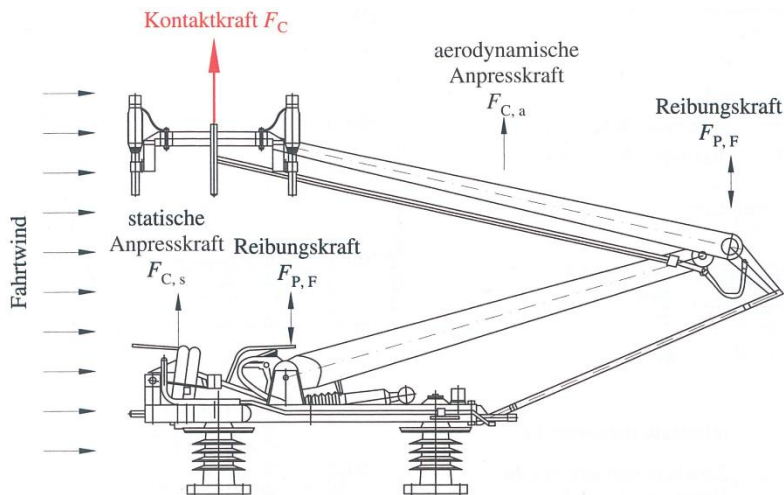


Abbildung 1: Kräfte am Stromabnehmer [1]

Die Definition dieser Grenzen findet sich in Normen wie der EN 50367 oder der EN 50119, aber auch in betreiberspezifischen Richtlinien. Im Falle der beiden Tunnel LBT und GBT ist die **Netzzugangsrichtlinie I-50088 [D2]** der Infrastrukturbetreiber BLS AG und SBB AG für die weitere Untersuchung relevant. Eine Besonderheit findet sich darin im Kap. 5.1.2: „**Die Kontaktkraft-Messungen im Gotthard- und Ceneri-Basistunnel (GBT / CBT) bestätigen, dass die Grenzwerte gemäß SN EN 50367 aufgrund aerodynamischer Effekte nicht vollständig eingehalten werden können. Diese Feststellung hat man bereits im Lötschberg-Basistunnel (LBT) gemacht und einzelne Grenzwerte entsprechend angehoben.**“ Ursächlich ist dafür unter anderem der noch engere Tunnelquerschnitt des GBT gegenüber dem LBT. Aus diesem Grund gelten auf den Referenzstrecken des GBT – unabhängig von der Betriebsgeschwindigkeit – die Grenzwerte für $v_{\max} \leq 250$ km/h.

Die **Kontaktkraftgrenzwerte** umfassen die mittlere, maximale und minimale Kontaktkraft sowie die Standardabweichung der mittleren Kontaktkraft. Berechnet werden sie für einen ausgewählten zusammengehörigen Streckenabschnitt. Die beiden Tunnel LBT und GBT sind Teil der Referenzstrecken im erweiterten Geschwindigkeitsbereich (EGB, $v > 160$ km/h). Tabelle 3 zeigt eine Übersicht der Grenzwerte für die insgesamt vier EGB-Strecken. Ein Vergleich der Grenzwerte zeigt:

- Der Grenzwert für die zulässige mittlere Kontaktkraft F_m liegt im GBT bei 130 N und ist damit 10 N höher als im LBT mit 120 N.
- Als maximale Kontaktkraft F_{\max} gilt ein Grenzwert von 250 N in beiden Tunneln, wobei im LBT in Einzeltraktion nur 230 N zulässig sind.
- Die niedrigste Kontaktkraft F_{\min} ist in beiden Tunneln mit 0 N festgelegt. Bei Einzeltraktion gilt im LBT eine schärfere Einschränkung von 10 N.
- Für die maximale Standardabweichung σ_{\max} gilt die normative Empfehlung von 30% von F_m bei Höchstgeschwindigkeit in beiden Tunneln.

Nach Vergleich der Grenzwerte wird die eingangs in Kapitel 1.1 aufgestellte Untersuchungsfrage nun wie folgt präzisiert: **Welche Auswirkung hat eine Anhebung des mittleren Kontaktkraftgrenzwertes F_m von 120 N auf 130 N hinsichtlich Betriebssicherheit und Lebensdauer der Fahrleitung im LBT?**

Tabelle 3: Grenzwerte der Kontaktkraft in GBT und LBT [D2]

Referenzstrecken EGB:		NBS:	GBT:	CBT:	LBT:
Betriebliche Streckenhöchstgeschwindigkeit V_{\max}					
V_{\max} [km/h]	Offene Strecke	200 km/h	200 km/h	-	-
	Tunnel		230 km/h	230 km/h	200 km/h
Mittlere Kontaktkraft F_m					
F_m [N]	Offene Strecke	$F_m = 79 - 109$ N			
	Doppelspur-tunnel	$F_m \leq 120$ N	-	-	-
	Einspur-tunnel	-	$F_m \leq 120$ N		
$F_{m,lim}$ [N]	Grenzwert im Ausnahmefall	-	$F_{m,lim} \leq 130$ N ⁶	$F_{m,lim} \leq 165$ N ⁷	-
Maximalwerte der Kontaktkraft F_{\max}					
F_{\max} ⁸ [N]	Einzeltraktion	$F_{\max} = 230$ N	$F_{\max} = 250$ N	$F_{\max} = 250$ N	$F_{\max} = 230$ N
	Doppeltraktion	$F_{\max} = 250$ N			$F_{\max} = 250$ N
$F_{\max,lim}$ ⁹ [N]	Grenzwert im Ausnahmefall	$F_{\max,lim} = 350$ N			
Minimalwerte der Kontaktkraft F_{\min}					
F_{\min} [N]	Einzeltraktion	$F_{\min} = 10$ N	$F_{\min} = 0$ N ¹⁰		$F_{\min} = 10$ N
	Doppeltraktion	$F_{\min} = 0$ N			$F_{\min} = 0$ N
Standardabweichung der mittleren Kontaktkraft σ					
σ_{\max} [N]		$\sigma_{\max} = 36$ N	$\sigma_{\max} = 40$ N ¹¹		$\sigma_{\max} = 36$ N
Fahrdrachthub					
Maximal zulässiger Fahrdrachthub [mm]		150 mm	120 mm	-	120 mm

Tabelle (Tab.) 5-1: Messgrößen und Grenzwerte für die Beurteilung von Fahrzeugen

⁶ Da das Fahrleitungssystem im GBT für eine technische Höchstgeschwindigkeit von 250 km/h gebaut und abgenommen wurde, darf die Fahrleitung in Abstimmung mit dem Technischen Netzzugang gemäss SN EN 50367 mit einer mittleren Stromabnehmer-Kontaktkraft F_m von 130.65 N belastet werden.

⁷ Da das Fahrleitungssystem im CBT für eine technische Höchstgeschwindigkeit von 250 km/h gebaut und abgenommen wurde sowie der Tunnel über einen engen Querschnitt ≤ 55 m² verfügt, darf die Stromschiene in Abstimmung mit dem Technischen Netzzugang gemäss SN EN 50367 mit einer maximalen mittleren Stromabnehmer-Kontaktkraft von $F_{m,max} \leq 164.73$ N belastet werden.

⁸ Der Grenzwert gemäss SN EN 50367 wird grundsätzlich im Normalfall für homogene Streckenabschnitte angewendet.

⁹ Der Grenzwert im Ausnahmefall gemäss SN EN 50119 (Tabelle 4) kann durch den Technischen Netzzugang der SBB Infrastruktur für einzelne singuläre Punkte, bei welchen der Grenzwert gemäss SN EN 50367 überschritten wird, angewendet werden.

¹⁰ Dieser Grenzwert wird für homogene Abschnitte angewendet. Für einzelne singuläre Punkte können durch den Technischen Netzzugang der SBB Infrastruktur analog F_{\max} vereinzelte Unterschreitungen toleriert werden (sogenannte Nulldurchgänge).

¹¹ Für die technische Höchstgeschwindigkeit von 250 km/h gilt $\sigma_{\max} = 40$ N [$0.3 \cdot F_m = 0.3 \cdot 130.65$ N].

In [D2] sind weitere Limitierungen zu den obigen Grenzwerten für geringere Stromabnehmerabstände im Mehrfachstromabnehmerbetrieb vorgesehen.

2.2 Vergleich der Tunnelstrecken

2.2.1 Gotthard-Basistunnel (GBT)

Mit circa 57 Kilometern und einer maximalen Neigung von 8 ‰ ist der Gotthard-Basistunnel der derzeit längste Eisenbahntunnel der Welt. Er verbindet das nördliche Erstfeld im Kanton Uri mit dem südlichen Bodio im Kanton Tessin. Das Bauwerk besteht aus zwei Einspurröhren, welche alle 325 Meter miteinander verbunden sind. Im Jahr 2016 fand die Inbetriebnahme statt.

Rund 50 Personenzüge (Intercity- und Eurocity-Züge) befahren im Mittel täglich den GBT. Für Güterzüge besteht eine Kapazität von bis zu 260 Zügen pro Tag. Diese Relationen werden verwendet, um später eine Verschleißrate zu ermitteln (Kapitel 6). Hierzu muss die Anzahl der Stromabnehmerdurchgänge abgeschätzt werden, da für LBT und GBT keine exakten Daten verfügbar sind.¹

Die operative Höchstgeschwindigkeit im GBT ist 250 km/h.

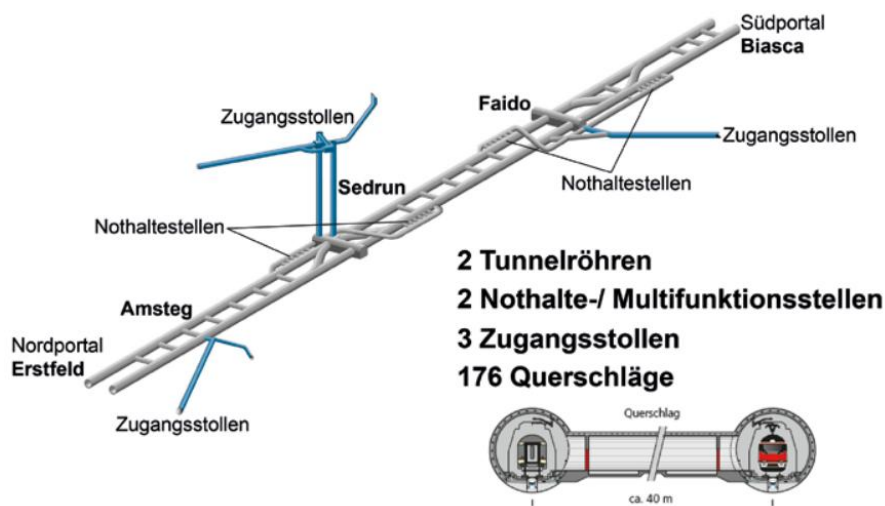


Abbildung 2: Übersichtskarte Gotthard-Basistunnel [2]

¹ <https://www.news.admin.ch/de/nsb?id=64811>

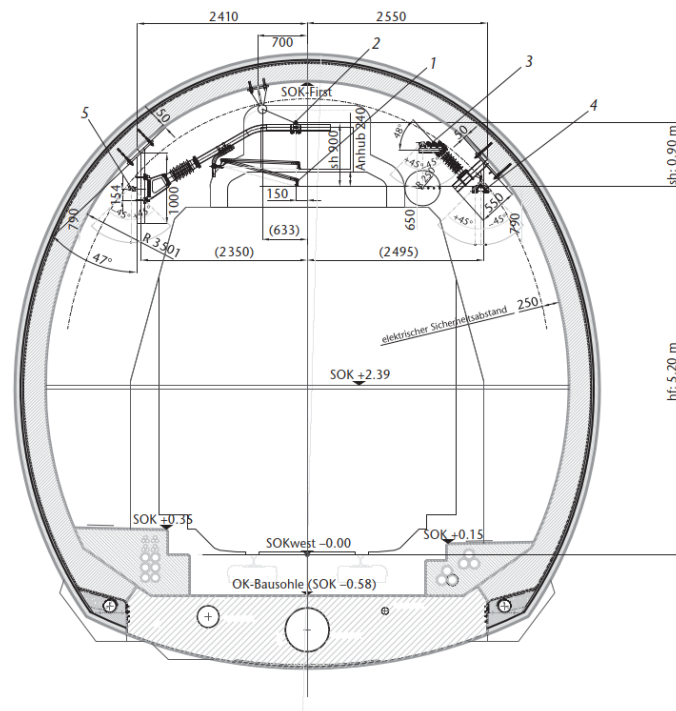


Abbildung 3: Querschnitt des GBT [3]

Der GBT weist einen Querschnitt von 41 m^2 [4] auf (vgl. Abbildung 3). Die maximal zulässige Achslast beträgt 25 t [5].

2.2.2 Lötschberg-Basistunnel (LBT)

Der Lötschberg-Basistunnel (LBT) ist ein $34,6$ Kilometer langer Eisenbahntunnel, der im Jahr 2007 in Betrieb genommen wurde. [6] Die Tunnelportale befinden sich in Frutigen im Berner Oberland und Raron im Kanton Wallis. Der Tunnel umfasst zwei einspurige Tunnelröhren. Sie sind im Mittel alle 333 Meter über insgesamt 108 Querstellen verbunden. Die Tunnelröhre auf westlicher Seite befindet sich in einem Teilausbau, so dass am Nordportal ein Kilometer und am Südportal (Ferden - Raron) etwa 14 Kilometer mit Bahntechnik ausgerüstet sind. Im Mittelabschnitt der Weströhre (Mitholz – Ferden) sind weitere etwa 14 Kilometer Tunnel ausgebrochen, jedoch ohne Bahntechnik versehen. Diese sollen in einem noch ausstehenden Ausbauschnitt für den Betrieb bereit gemacht werden. Die restlichen sieben Kilometer zum Vollausbau (Frutigen – Mitholz) folgen danach [6]. Somit ist derzeit auf 21 km nur einspuriger Betrieb möglich. Einen Überblick zu den Abschnitten gibt Abbildung 4. Der Scheitelpunkt des Tunnels liegt in Mitholz. Von dort in Richtung Norden beträgt die Neigung maximal 3 ‰ und in Richtung Süden maximal 13 ‰ . [7] Die Gleisradien sind größer als 4.000 m [7]. Die dimensionierte Höchstgeschwindigkeit im LBT ist 250 km/h .

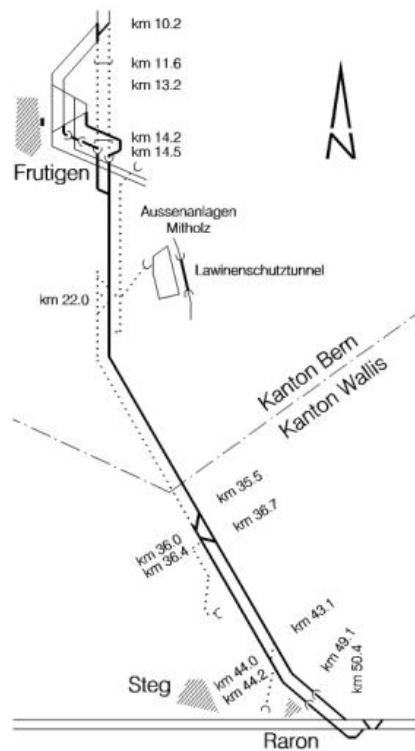


Abbildung 4: Übersichtskarte Lötschberg-Basistunnel [D1]

Im LBT wurden rund 30 % der Röhren und Stollen mit Tunnelbohrmaschinen ausgebrochen und weisen somit einen kreisrunden Querschnitt auf. Der Rest wurde mit Sprengungen vorgetrieben, die ein hufeisenförmigen Querschnitt erzeugten. (vgl. Abbildung 5). [7] Die mittlere Querschnittsfläche beträgt 45 m². [4] Es ist eine feste Fahrbahn verbaut. Drei Überleitverbindungen erlauben den Spurwechsel im Tunnel. Der Spurwechsel in Ferden kann mit einer Geschwindigkeit von 180 km/h stattfinden.

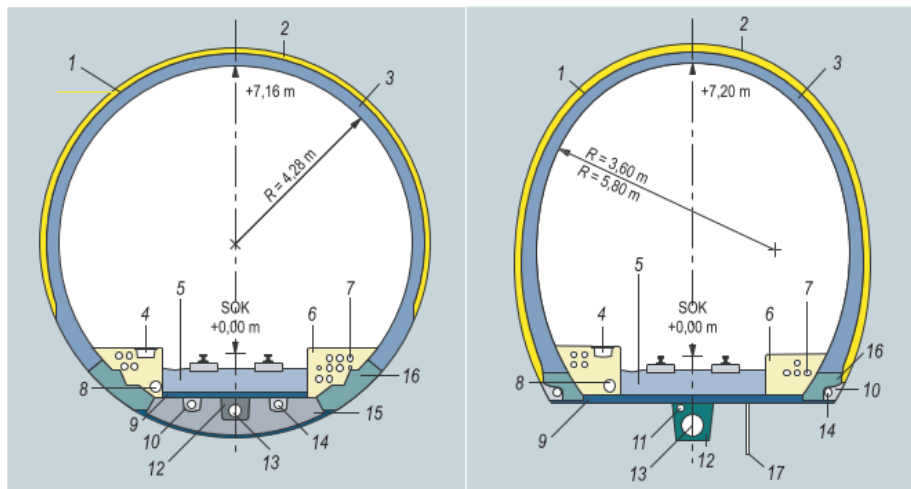


Bild 2: Querschnitte des Lötschberg-Basistunnels; *links* bei Bohrvortrieb, *rechts* bei Sprengvortrieb.

- | | |
|-----------------------------------|--------------------------------|
| 1 Abdichtung und Drainage | 10 Sickerkies |
| 2 Ausbruchsicherung | 11 Sickerleitung |
| 3 Verkleidungsbeton $\geq 0,28$ m | 12 Hüllbeton |
| 4 Kabelkanal | 13 Sammelleitung Bergwasser |
| 5 Beton-Gleisplatte | 14 Entwässerung Drainagewasser |
| 6 Bankett | 15 Sohlröhrling |
| 7 Kabelrohrblock | 16 Kicker |
| 8 Tunnelabwasserleitung | 17 Entlastungsbohrungen |
| 9 Sohlbeton | SOK Schienenoberkante |

Abbildung 5: Querschnitte des LBT [8]

2.3 Technische Analyse der Oberleitungstypen

2.3.1 Konstruktive Parameter

Die beiden Oberleitungstypen in LBT und GBT sind ähnlich zu einer deutschen Re 250 Oberleitung. Sie haben jedoch im Vergleich zur Variante im Nachbarland keine Y-Beiseile. Aber auch untereinander unterscheiden sich die Oberleitungstypen in Anzahl der Hänger, Abstand des ersten Hängers vom Stützpunkt, Systemhöhe, Spannweite sowie Nachspannlänge, Vordurchhang und Zugkraft des Fahrdrathes.

Die Bauartbezeichnung für die Oberleitungsanlage im GBT ist *R 250 GBT*. Sie basiert auf den Erfahrungen der Re 250 (DB) und Re 330 (DB). [3] Die Oberleitung kann mit den Schweizer Stromabnehmerwippen S2 und S3 sowie der Eurowippe befahren werden. [9, 10] Im Tunnel herrschen Temperaturen von circa 40 °C bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 70 %. [3] Abbildung 6 zeigt den Aufbau eines Kettenwerkfeldes (oben) sowie einer Nachspannlänge (unten).

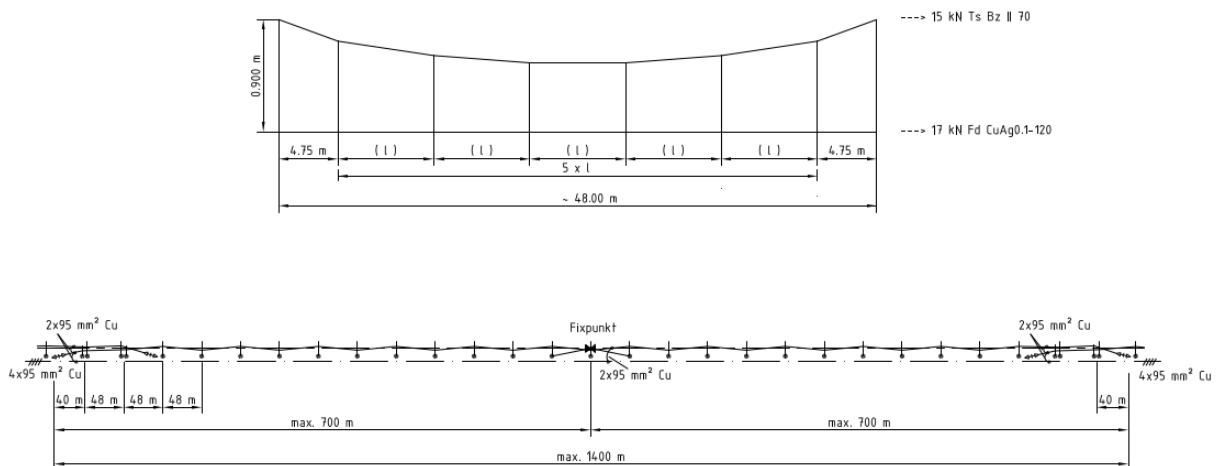


Abbildung 6: Schematische Darstellung des Kettenwerk im GBT [D5]

Die Bauartbezeichnung für die Oberleitungsanlage im LBT ist *Re 250 LBL-T II*. Sie basiert auf einer Re 250 der DB AG [D1] und ist für eine Befahrung bis zu 250 km/h ausgelegt. Die Lötchbergstrecke ist ausgebaut für das Schweizer Lichtraumprofil EBV 4. In den Planungen wurde ein (späterer) Umbau auf das sogenannte Shuttle-Profil vorgesehen, dass es erlaubt, 5,45 m hohe und 3,70 m breite Autoverladewagen durch den Tunnel verkehren zu lassen (höhere Fahrdrathöhe erforderlich). Beim Shuttle-Profil wird die Längsspannweite halbiert, wobei nur an jedem zweiten Stützpunkt Seitenhalter eingesetzt werden. Die Seitenverschiebung des Fahrdrahtes bleibt damit gleich. An den bestehenden Stützpunkten bleibt das Tragrohr mit Tragseildrehklemme bestehen und nur der Fahrdrahtstützpunkt wird zur Verringerung der Systemhöhe verändert. Das Kettenwerk ist für Stromabnehmer vom Typ EBV S1, S2, S3 sowie die Eurowippe ausgelegt. Die Überlappungen zwischen den Kettenwerken sind dreifeldrig ausgeführt. Die Fahrdrähte im parallelen Feld haben einen Abstand von 300 mm. [7] In Abbildung 7 ist der schematische Aufbau eines Kettenwerkfeldes im LBT dargestellt.

Der Tunnel weist Temperaturen von 35 °C und eine relative Luftfeuchtigkeit von 80 % auf. Circa vier Kilometer vor den Tunnelöffnungen beginnt die Anpassung der Temperatur an die Außentemperaturen. [7]

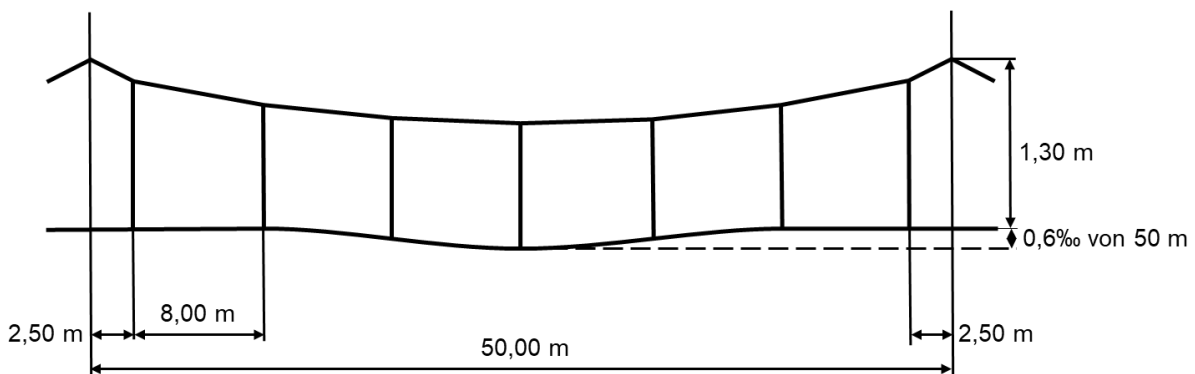


Abbildung 7: Schematische Darstellung des Kettenwerk im LBT (EBV 4) [7]

Tabelle 4 fasst die konstruktiven Systemparameter der OLA in LBT und GBT zusammen. Beide OLA verwenden die gleichen Materialien und Querschnitte für

Fahrdrabt-, Tragseil- und Hänger. Die Tragseile werden mit $H=15$ kN getrennt vom Fahrdrabt nachgespannt. Im GBT wird der Fahrdrabt mit 17 kN gegenüber den 15 kN im LBT etwas stärker nachgespannt (+13 %). Nach (2) ergeben sich dadurch unterschiedliche **Längsspannungen** σ im Fahrdrabt. Im GBT liegt diese bei 141,67 N/mm² und im LBT bei 125 N/mm². Es sind keine Y-Beiseile verbaut. Durch die eingeschränkte Querschnittsfläche der Tunnel ist die Systemhöhe begrenzt auf 0,9 m im GBT und 1,3 m im LBT (EBV 4).

$$H_0 = \sigma_{FD} \cdot A_{FD} \quad (2)$$

Tabelle 4: Konstruktive Systemparameter der Oberleitungsanlagen im GBT und LBT [D1] [D5]

Parameter	GBT	LBT
Fahrdrabt (FD)	RiS 120 mm ² 17 kN	RiS 120 mm ² , AC 120 mm ² 15 kN 1,07 kg/m
Tragseil (TS)	Bz II 70 mm ² 15 kN	Bz II 70 mm ² 15 kN 0,60 kg/m
Hänger	Bz II 10 mm ² (stromfest)	Bz II 10 mm ² (stromfest)
Y-Beiseil	-	-
Nennfahrdrabthöhe	5,20 m	5,30 m
Nennsystemhöhe	0,90 m	1,30 m
Minimale Hängerlänge	> 500 mm	> 500 mm (Regel: > 670 mm)
Zick – Zack	+/- 150 mm	+/- 200 mm (max.: +/- 225 mm)
Max. Nachspannlänge	1400 m (2 x 700 m)	Regel 1080 m, 1180 m (Portalbereich 1180 m) (Tunnelbereich 1380 m)
Max. Spannweite	48 m	51 m Regel: 50 m
Vordurchhang	keiner	0,6 ‰ der Längsspannweite
e_{Feldmitte}	0,375 mm/N	0,425 mm/N

Für Oberleitungen kann die **Elastizität e** angegeben werden. Diese beschreibt das Verhältnis von Anhub zu am Fahrdrabt gemessener Kraft und wird in Millimeter je Newton (mm/N) angegeben. In Feldmitte kann die Elastizität des Kettenwerks nach Formel (3) abgeschätzt werden. Der Elastizitätsfaktor k_e ist für Oberleitungen ohne Y-Beiseil etwas größer ($k_e=4$) als für Oberleitungen mit Y-Beiseil ($k_e=3,5$), wodurch die Elastizität niedriger ist. Eine größere **Spannweite l** erhöht die Elastizität in Feldmitte, was eine Limitierung des Stützpunktabstandes erfordert, vor allem bei Befahrung mit höheren Geschwindigkeiten.

$$e = \frac{l}{k_e \cdot (H_{FD} + H_{TS})} \quad (3)$$

Die Elastizität sowie die vom Stromabnehmer erzeugte mittlere Anpresskraft beeinflussen den statischen Anteil des Fahrdrachthubs. Bei höheren Befahrgeschwindigkeiten kommt noch ein weiterer Anteil hinzu, welcher von den dynamischen Oberleitungskenngrößen (Kap. 2.3.2) geprägt ist.

Zusammenfassend zeigt sich, dass die Grundstruktur der Oberleitung in LBT und GBT bestehend aus Fahrdraht, Tragseil und Hängern gleich ist. Auch das keine Y-Beiseile verwendet werden. Die Wahl der konkreten technischen Parameter weist jedoch Unterschiede auf. Zu nennen sind hier die höhere Fahrdrahtzugspannung im GBT (17 kN statt 15 kN) und die größere Systemhöhe im LBT (1,3 m statt 0,9 m). Weiter beträgt der Vordurchhang im LBT 0,6 ‰ der Längsspannweite, hingegen wird im GBT darauf gänzlich verzichtet.

Eine größere **Systemhöhe** führt zu günstigeren dynamischen Eigenschaften, was sich beispielsweise in einer geringeren Standardabweichung der Kontaktkraft zeigt. Variationsrechnungen zeigen, dass der Einfluss auf den Kontaktkraftverlauf auch bei niedrigen Systemhöhen eher gering ist. Der Parameter hat eine geringe Sensitivität. Niedrige Systemhöhen können jedoch die Extrema der Kontaktkraft verstärken. Im Hochgeschwindigkeitsverkehr beeinflusst die minimale Hängerlänge die Wahl von Stützpunktstand und Systemhöhe. [1] Es wird daher vermutet, dass die Extrema der Kontaktkraft im LBT etwas geringer sind als im GBT.

Der **Vordurchhang** soll eine Kontaktbahn mit konstanter Fahrdrachthöhe ermöglichen. Dies ist jedoch nur für den statischen Anhub bei einer bestimmten Kraft möglich. In der realen Befahrung bestimmen die Bauart des Stromabnehmers (Eigenschwingverhalten) und die Fahrgeschwindigkeit den tatsächlichen Anhub. Eine gleichmäßige Elastizität führt zu einem konstanten statischen Anhub und einer geringeren Höhenbewegung der Stromabnehmerwippe. Der Vordurchhang wirkt dem Elastizitätsunterschied zum Stützpunkt entgegen. Der Einfluss auf die Kontaktkraft ist gering. Mit Zunahme des Vordurchhangs kann es zu einer Zunahme der Standardabweichung der Kontaktkraft kommen. [1] Der Vordurchhang im LBT könnte zu etwas geringeren Fahrdrachthüben führen.

Allein aus der Wahl der konstruktiven Parameter heraus lässt sich das dynamische Verhalten der beiden Oberleitungstypen miteinander kaum objektiv vergleichen. Auch ist eine qualitative Aussage über die Befahrgüte hinsichtlich Kontaktkraft und Anhub über die obigen Anmerkungen hinaus praktisch nicht möglich. Daher werden im nächsten Kapitel 2.3.2 dynamische Kennwerte für die beiden Oberleitungen berechnet und miteinander verglichen.

2.3.2 Dynamische Kennwerte

Ein sich bewegendes Stromabnehmer mit einer Anpresskraft erzeugt in einer Fahrleitung eine örtlich vertikale Bewegung. Unter der Modellannahme einer gespannten Saite ohne Biegesteifigkeit, aber mit der **Längsspannung σ** und der **spezifischen Masse ρ** , lässt sich die **Wellenausbreitungsgeschwindigkeit c_p** in einem Draht mit Formel (4) berechnen. Der Fahrdrachthub ist abhängig von der **Fahrgeschwindigkeit v** und der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit. Bei einer Annäherung beider wächst die Auslenkung des Fahrdrachtes stetig an. Die Energieübertragung zwischen Oberleitung und Stromabnehmer wird nahezu unmöglich. Die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit stellt damit eine physikalische

Grenze dar. Erfahrungsgemäß sollte die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit mindestens das 1,4- bis 1,5-fache der maximalen Fahrgeschwindigkeit betragen. [1]

$$c_p = \sqrt{\frac{\sigma_{FD}}{\rho_{FD}}} = \sqrt{\frac{H_0}{m'_{FD}}} \rightarrow c_{FD} = \sqrt{\frac{H_{FD}}{m'_{FD}}} \quad (4)$$

Die mittlere **Wellenausbreitungsgeschwindigkeit** \bar{c} im Kettenwerk kann nach (5) berechnet werden.

$$\bar{c} = \sqrt{\frac{H_{FD} + H_{TS}}{m'_{FD} + m'_{TS}}} \quad (5)$$

Beim Auftreffen einer Welle auf Unstetigkeiten im Kettenwerk, wie Massenansammlungen oder Einspannungen, erfolgt eine Reflexion und eine Transmission der Welle. Massenansammlungen, die zu einer Unstetigkeit führen, sind beispielsweise Hänger. Eine Welle im Fahrdraht führt zu einer Bewegung und Trägheitskraft des Hängers und zu einer Reaktionskraft des initial ruhenden Tragseils. Mit einer vernachlässigbaren kleinen Masse von Hänger und Klemmen im Vergleich zu Fahrdraht- und Tragseilmasse sowie bei kleinen Frequenzen, kann der **Reflexionsfaktor** r nach Formel (6) berechnet werden. Der Hänger wird anteilig durch die angrenzenden Fahrdrahtsegmente und deren Zugspannung vorgespannt. Eine Welle im Fahrdraht reduziert diese Vorspannung. Wenn die Gesamtspannung im Hänger negativ wird, knickt der Hänger ein. Der Reflexionsfaktor kann dafür als Indikator dienen: Das Risiko des Hängereinknickens wird kleiner, je kleiner der Reflexionsfaktor ist. Das Einknicken führt zu erhöhtem Verschleiß und einer reduzierten Biegebelastbarkeit des Hängers. Der Reflexionsfaktor wird kleiner, wenn beispielsweise die Zugkraft im Fahrdraht vergrößert wird (vgl. (6)). [1]

$$r = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{H_{FD} \cdot m'_{FD}}{H_{TS} \cdot m'_{TS}}}} \quad (6)$$

Bei Reflexion einer Transversalwelle im Kettenwerk tritt keine Amplitudenvergrößerung auf. Eine solche Vergrößerung kann jedoch am bewegten Stromabnehmer stattfinden, wenn die Welle zurückläuft. Die Kontaktkraft zwischen Stromabnehmer und Fahrdraht kann durch einen solchen Impuls verändert werden. Der **Dopplerfaktor** α_D in (7) beschreibt die Veränderung der Kontaktkraft am Fahrdraht. [1]

$$\alpha_D = \frac{c_{FD} - v}{c_{FD} + v} \quad (7)$$

Nach dem Dopplereffekt folgt eine Stauchung der Welle in Befahrtrichtung und eine Dehnung entgegen der Fahrtrichtung, wenn der Stromabnehmer als Signalerzeuger und eine Inhomogenität als Signalempfänger angesehen wird. Die Wellenlänge der Schwingung reduziert sich in Fahrtrichtung.

Der **Verstärkungsfaktor** γ_A beschreibt das Verhältnis von Reflexionsfaktor und Dopplerfaktor (vgl. (8)). Er kann herangezogen werden, um die Kraftwirkung zwischen Stromabnehmer und Oberleitung zu beschreiben. Wenn der Verstärkungsfaktor größer eins ist, ist der Kraftsprung größer als der ihn erzeugende Kraftsprung durch

den Impuls der Welle. Das System schaukelt sich bis zum Ort der Inhomogenität auf. Bei einem Verstärkungsfaktor kleiner eins klingen die Schwankungen der Kontaktkraft ab. Nach Betriebserfahrungen lassen sich Oberleitungen für einen Verstärkungsfaktor bis $\gamma_A = 2,5$ zuverlässig betreiben. [1]

$$\gamma_A = \frac{r}{\alpha_D} \quad (8)$$

Der Dopplerfaktor ist eine Funktion der Geschwindigkeit und damit auch der Verstärkungsfaktor. Für den Fall, dass der Verstärkungsfaktor gleich eins ist, ergibt sich die **Grenzgeschwindigkeit** v_a (siehe Formel (9)), bis zu welcher keine Verstärkung der Kraftamplituden auftritt. Sie ist immer kleiner als die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit im Fahrdraht. [1]

$$v_a = c_{FD} \frac{1 - r}{1 + r} \quad (9)$$

Ein Kettenwerk hat zahlreiche **Eigenfrequenzen**. Kettenwerke, die aus gleichen Mastfeldern aufgebaut sind, besitzen symmetrische und antisymmetrische Schwingungsmoden. Bei *symmetrischen Moden* v_2 schwingen spiegelbildlich gelegene Fahrdrahtpunkte in gleicher Phase und in der Symmetrieachse ist ein Schwingungsbauch. Bei *antisymmetrischen Moden* v_1 schwingen die Fahrdrahtpunkte in Gegenphase und in der Symmetrieachse ist ein Schwingungsknoten. Für Kettenwerke mit gerader Anzahl an Mastfeldern befindet sich die Symmetrieachse in einem Stützpunkt. Die Wellenlänge der Grundschwingung der antisymmetrischen Schwingung ist gleich dem doppelten **Mastabstand** l . Die Frequenz berechnet sich nach (10). Für die symmetrische Schwingung wird der *Abstand vom Stützpunkt zum ersten Feldhänger* l_1 einbezogen. Die Berechnung erfolgt nach (11). [1]

$$v_1 = \frac{\bar{c}}{2l} = \frac{\sqrt{\frac{H_{FD} + H_{TS}}{m'_{FD} + m'_{TS}}}}{2l} \quad (10)$$

$$v_2 = \frac{\bar{c}}{2l + l_1} = \frac{\sqrt{\frac{H_{FD} + H_{TS}}{m'_{FD} + m'_{TS}}}}{2l + l_1} \quad (11)$$

Die eben beschriebenen dynamischen Oberleitungskenngrößen werden auf Basis der konstruktiven Parameter aus Tabelle 4 für LBT und GBT berechnet und vergleichend in Tabelle 5 gegenübergestellt.

Die **Wellenausbreitungsgeschwindigkeit** des Fahrdrahtes ist im GBT höher als im LBT, da die Nachspannkraft mit 17 kN im GBT gegenüber der 15 kN im LBT größer ist. EN 50119 empfiehlt ein maximales Verhältnis von maximaler Fahrgeschwindigkeit zu Wellenausbreitungsgeschwindigkeit kleiner 70 %. Im GBT liegt das Verhältnis mit einer maximalen Geschwindigkeit von 250 km/h bei 55 % und im LBT mit einer Geschwindigkeit von 200 km/h bei 47 %. Beide Tunnel erfüllen damit die normative Anforderung. Aufgrund der höheren Nachspannkraft im Fahrdraht eignet sich die OLA im GBT tendenziell für höhere Fahrgeschwindigkeiten im Vergleich zum LBT.

Tabelle 5: Vergleich berechneter dynamischer Oberleitungskenngrößen für LBT, GBT und Re 250 (DB)*

	GBT	LBT	Re 250 (DB)
Wellenausbreitungsgeschwindigkeit Fahrdraht c_{FD}	453,6 km/h	426,2 km/h	427,0 km/h
Wellenausbreitungsgeschwindigkeit Kettenwerk \bar{c}	498,2 km/h	482,4 km/h	482,0 km/h
Reflexionsfaktor r	0,413	0,428	0,425
Dopplerfaktor α_D ($v = 250$ km/h)	0,290	0,260	0,26
Verstärkungsfaktor γ_A ($v = 250$ km/h)	1,426	1,643	1,63
Grenzgeschwindigkeit v_a	188,6 km/h	170,6 km/h	172,3 km/h
Eigenfrequenz v_1 (antimetrische Schwingung)	1,44 Hz	1,34 Hz	1,03 Hz
Eigenfrequenz v_2 (symmetrische Schwingung)	1,37 Hz	1,31 Hz	0,96 Hz

* Es wurden die Systemparameter aus Tabelle 4, Abbildung 6 und Abbildung 7 verwendet und eine maximale Fahrgeschwindigkeit von 250 km/h für die Vergleichbarkeit unterstellt. Die Werte für Re 250 wurden aus [1] übernommen.

Der **Reflexionsfaktor** ist abhängig von den Zugkräften im Kettenwerk. Nach Tabelle 5 ist er für den LBT ähnlich hoch einer deutschen Re 250, wobei er für den GBT am niedrigsten ist. Demzufolge ist das Risiko einknickender Hänger im GBT geringer als bei den beiden anderen OLA. Der **Dopplerfaktor** ist im GBT höher als im LBT, was zu vergleichsweise höheren Kontaktkraftverstärkungen aufgrund reflektierter Wellen führt. Das Verhältnis beider vorheriger Werte führt zum **Verstärkungsfaktor**. Er ist für beide Tunnel größer eins, was zu einer verstärkenden Kraftwirkung am Stromabnehmer führt. Dennoch liegt er unterhalb des Erfahrungswertes von 2,5 für einen zuverlässigen und sicheren Betrieb. Auch hier ist der Wert im GBT kleiner als im LBT und damit insgesamt günstiger. Die **Grenzgeschwindigkeit** ist mit 188,6 km/h im GBT etwas höher als im LBT mit 170,6 km/h.

Die **Eigenfrequenzen** für den GBT errechnen sich über den Stützpunktabstand von $l = 48$ m und Hängerabstand von $l_1 = 4,75$ m (vgl. Abbildung 6). Für den LBT gilt $l = 50$ m und $l_1 = 2,5$ m (vgl. Abbildung 7). Die Re 250 (DB) weist die Längen $l = 65$ m und $l_1 = 10$ m auf [1]. Geringere Stützpunktabstände in GBT und LBT führen zu eicht höheren niedrigsten Eigenfrequenz im Vergleich zur deutschen Re 250. Die niedrigsten Eigenfrequenzen von GBT und LBT sind nahezu gleich groß.

Wie in Tabelle 5 dargestellt, sind die dynamischen Kennwerte für die OLA in GBT und LBT ähnlich groß. Dies lässt vermuten, dass sich beide Fahrleitungen unter Krafteinwirkung auch ähnlich verhalten werden. Im Detail lassen die Kennwerte aber keine eindeutigen Rückschlüsse zu, welche Oberleitung sich hinsichtlich Kontaktkraftverlauf und Fahrdrahtanhub günstiger verhalten wird. Zumal dies auch wesentlich durch das Eigenschwingverhalten der Stromabnehmer und des Abstandes untereinander beeinflusst wird. Die Wahl der konstruktiven Parameter und die berechneten dynamischen Kennwerte lassen vermuten, dass die OLA im GBT für eine etwas höhere Befahrgeschwindigkeit als im LBT ausgelegt wurde, wenngleich beide OLA für eine maximale Geschwindigkeit von 250 km/h dimensioniert sind.

3 Auswertung von Kraftmessungen am Stromabnehmer

3.1 Methodik und verwendete Daten

Bisher wurden die Fahrleitungen der beiden Tunnel eher theoretisch miteinander verglichen (vgl. in Kapitel 2). Nun sollen diese Betrachtungen durch die Auswertung von realen Kraftmessungen am Stromabnehmer vertieft werden. Besonderes Augenmerk der Analysen soll hierbei auf den aerodynamischen Unterschieden liegen und wie weit diese sich in den Kontaktkräften widerspiegeln.

Folgende **Fragestellungen** werden vertieft analysiert:

- Ist der aerodynamische Einfluss in LBT und GBT vergleichbar hoch oder unterscheidet sich dieser in den beiden Tunneln signifikant voneinander? Wenn hohe Fadenkräfte gemessen werden (d.h. hohe aerodynamische Kraftkomponenten), sind dann auch hohe mittlere Kontaktkräfte messbar?
- Gibt es charakteristische Kontaktkraftverläufe für die beiden OLA? Ist eine Wiederholbarkeit der Messungen sichtbar, z.B. hinsichtlich Positionen lokaler Maxima?
- Kann auf Basis der vorhandenen Messdaten prognostiziert werden, wie eine höhere mittlere Kontaktkraft sich auf den Kontaktkraftverlauf auswirken würde?

Zur Beantwortung dieser Themen werden verschiedene in der Vergangenheit durchgeführte Messfahrten herangezogen. Als **Datenquellen** werden Prüfberichte für Kontaktkraftmessungen und Unbedenklichkeitserklärungen bezüglich der Interaktion Stromabnehmer und Fahrleitung ausgewertet. Nachfolgend sind die Messzüge und deren Fahrzeuge kurz beschrieben.

Der SBB **RABe 501** oder auch EC250, Giruno oder Stadler Smile ist ein elfteiliger einstöckiger Triebzug. Er ist insgesamt 200 m lang. Der Triebzug ist mit zwei Stromabnehmern vom Typ **Richard RM 254-214** ausgestattet. Sie befinden sich auf dem zweiten sowie achtem Triebwagen und der Abstand zwischen ihnen beträgt 89,4 m. Der Stromabnehmer auf dem zweiten Wagen wurde für Messungen durch einen Messstromabnehmer ersetzt. [D9] [D10] [D11]

Für den Intercity- und Interregioverkehr in der Schweiz wird der SBB RABDe bzw. **RABe 502** eingesetzt. Der Triebzug ist doppelstöckig und hat mit acht Wagen eine Länge von 200 m oder mit vier Wagen eine Länge von 100 m. Auf den beiden Triebköpfen befinden sich die Stromabnehmer. Für die Messungen wurde ein Messstromabnehmer des Typs **DSA200.701** anstatt des Serienstromabnehmers eingesetzt. [D12]

Als dritter Zugtyp wurde ein lokbespannter Zug mit zwei **Re 460** sowie mehreren dazwischenliegenden Pufferwagen ausgewertet. Der Zug hatte entweder einen Stromabnehmerabstand von 375 m mit fünf Einheitswagen IV sowie neun IC2000 Wagen oder von 215 m mit fünf Einheitswagen IV sowie drei IC2000 Wagen. Die Einheitswagen IV sind einstöckig, während die IC2000 Wagen doppelstöckig und damit höher sind. Es wurden jeweils die innenliegenden (wagenzugewandten) Stromabnehmer genutzt. Auf einer Lok war der Stromabnehmer vom Typ **Schunk WBL 85** (MPA) und auf der anderen vom Typ **Faiveley AX 15 kV** (MPB). [D13]

Konfiguration 1



Konfiguration 2

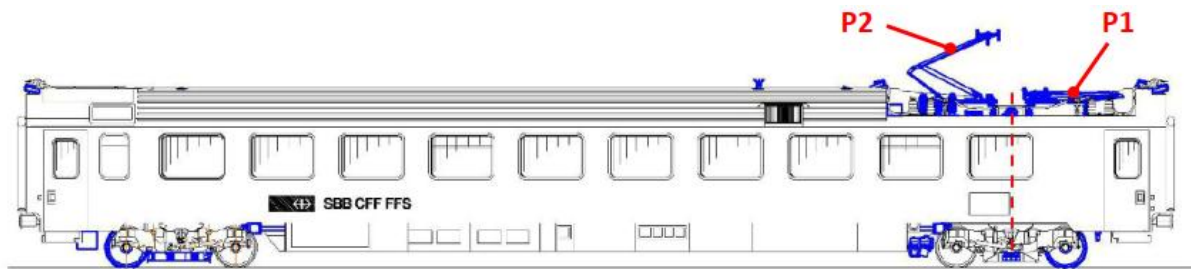


Abbildung 8: Aufbau des gezogenen Diagnosefahrzeuges [D7]

Die SBB betreibt ein **gezogenes Diagnosefahrzeug (gDFZ)** zum maschinellen Zustandsmonitoring der Infrastruktur. Der Zug besteht aus einer Lok, einem umgebauten EuroCity Wagen sowie einem Steuerwagen, wie Abbildung 8 darstellt. Auf dem Mittelwagen sind zwei Messstromabnehmer vom Typ **RM 354-214** der Firma Richard AG Murgenthal angebracht. Sie unterscheiden sich durch unterschiedliche Windleitbleche sowie statische Kräfte von 75 N des Pantograph 1 (P1) und 80 N des Pantograph 2 (P2). Die Messfahrten werden jeweils mit nur einem gehobenen Stromabnehmer durchgeführt. Die maximale Betriebsgeschwindigkeit beträgt 200 km/h. [D7] [D8]

Nachfolgend werden die Themen

- aerodynamische Kräfte am Stromabnehmer im Tunnel (Kapitel 3.2),
- Charakteristika im Kontaktkraftverlauf (Kapitel 3.3) sowie
- statistische Kennwerte der Kontaktkraft (Kapitel 3.4)

dargestellt.

3.2 Aerodynamische Kraftkomponente am Stromabnehmer

Die Luftbewegungen im Tunnel werden durch Form und Beschaffenheit der Tunnelröhre beeinflusst. Es entstehen aerodynamische Zug- und Drucklasten, die sich auf die Tunnelausrüstung und die Züge auswirken. Der Zug erzeugt durch seine Bewegung einen Überdruck vor sich und einen Unterdruck hinter sich. Die Luft im Tunnel kann nicht, wie auf offener Strecke, seitlich verdrängt werden. In Folge treibt der Zug im Tunnel eine Luftsäule vor sich her. Ein Anteil der Luft kann den Zug umströmen. Durch den verringerten Querschnitt erhöht sich die Geschwindigkeit dieses Luftstromes über die Fahrgeschwindigkeit. Das Versperrungsmaß gibt das Verhältnis zwischen der Querschnittsfläche des Zuges und des Tunnels an

($A_{\text{Zug}}/A_{\text{Tunnel}}$). [8] Bei größeren Versperrungsmaßen verstärken sich die Effekte. Die relative Strömungsgeschwindigkeit der Luft erhöht sich. Durch die höheren Luftgeschwindigkeiten im Bereich des Stromabnehmers vergrößert sich der aerodynamische Anteil der Kontaktkraft.

Besonders bei Tunneleinfahrt oder bei Querschnittssprüngen und -änderungen verändert sich die Strömungsgeschwindigkeit und damit die Kontaktkraft. Es kann zu dynamischen Anregungen kommen. Die relativen Anstiege der Strömungsgeschwindigkeit sind im Wesentlichen nicht geschwindigkeitsabhängig, sondern von der freien Querschnittsfläche abhängig. Die Einflussfaktoren auf die Strömungsgeschwindigkeit und die Kontaktkraft sind (vgl. [4] und [11]):

- Versperrungsmaß ($A_{\text{Zug}}/A_{\text{Tunnel}}$)
- Tunnelportal und Querschnittsänderungen im Tunnel
- Tunnellänge
- Luftgeschwindigkeiten durch Ventilation oder natürliche Luftdruckunterschiede
- Stromabnehmertyp und Fahrtkonfiguration (Spieß-, Kniegang)
- Zuglänge, Abstand des Stromabnehmers zur Zugspitze
- Stromabnehmeranzahl, -abstand (Mehrfachtraktion)
- Höhe des Kontaktpunktes Stromabnehmer und Fahrleitung (laminare / turbulente Strömungsverhältnisse)
- Verdrängungswirkung des Zuges
- Kopfform des Zuges
- Querschnittsänderungen des Fahrzeuges
- Gestaltung Zugdach

Um den Zug herum entwickeln sich Grenzschichten in der Luftströmung, unter anderem auf dem Dach des Zuges. Die Grenzschicht ist der Bereich über einer überströmten Fläche, in dem die mittlere Strömungsgeschwindigkeit von 0 m/s direkt an der Oberfläche bis auf 99% der Außengeschwindigkeit zunimmt. Ihre Dicke steigt in Strömungsrichtung an und kann bei langen Zügen mehrere Meter betragen. Die Grenzschicht beeinflusst die aerodynamischen Kräfte, die auf den Stromabnehmer wirken. Die Position des Stromabnehmers innerhalb oder außerhalb der Grenzschicht beeinflusst sein aerodynamisches Verhalten. Stromabnehmer, die sich innerhalb der Grenzschicht befinden, erfahren andere Strömungsverhältnisse als solche außerhalb der Grenzschicht. Über dem Zugdach bildet sich eine turbulente Grenzschicht, während im Zwischenraum darüber zum Tunnel eine laminare Strömung vorherrscht. Im laminaren Strömungsbereich bewegt sich die Luft von der Zugspitze zum Heck. Die Strömungsgeschwindigkeit nimmt mit zunehmender Grenzschichthöhe entlang des Zuges zu. [4]

Die Tunnelquerschnittsfläche ist im GBT etwas kleiner als im LBT. Dasselbe Fahrzeug wird daher ein größeres Versperrungsmaß im GBT verursachen als im LBT, was eine erhöhte Geschwindigkeit des Luftstroms am Stromabnehmer verursacht und damit zu einer höheren aerodynamischen Kraftkomponente führt.

Aufgrund der dargestellten aerodynamischen Effekte ist bei gleicher Geschwindigkeit die Anpresskraft eines Stromabnehmers im Tunnel höher als auf der offenen Strecke. Es folgt damit bei gleicher Elastizität der Oberleitung (Kap. 2.3.1) ein stärkerer statischer Fahrdrahtanhub.

Um das Kontaktkraftmesssystem zu kalibrieren, werden sogenannte **Seilmessfahrten (Fadenfahrten)** durchgeführt. Dazu wird der Stromabnehmer knapp unterhalb des Fahrdrahtes mittels eines Seiles geführt und dessen Seilkraft erfasst. Subtrahiert man davon die statische Anpresskraft erhält man die aerodynamische Kraftkomponente. Messungen zeigen, dass diese quadratisch mit der Fahrgeschwindigkeit ansteigt (Abbildung 9).

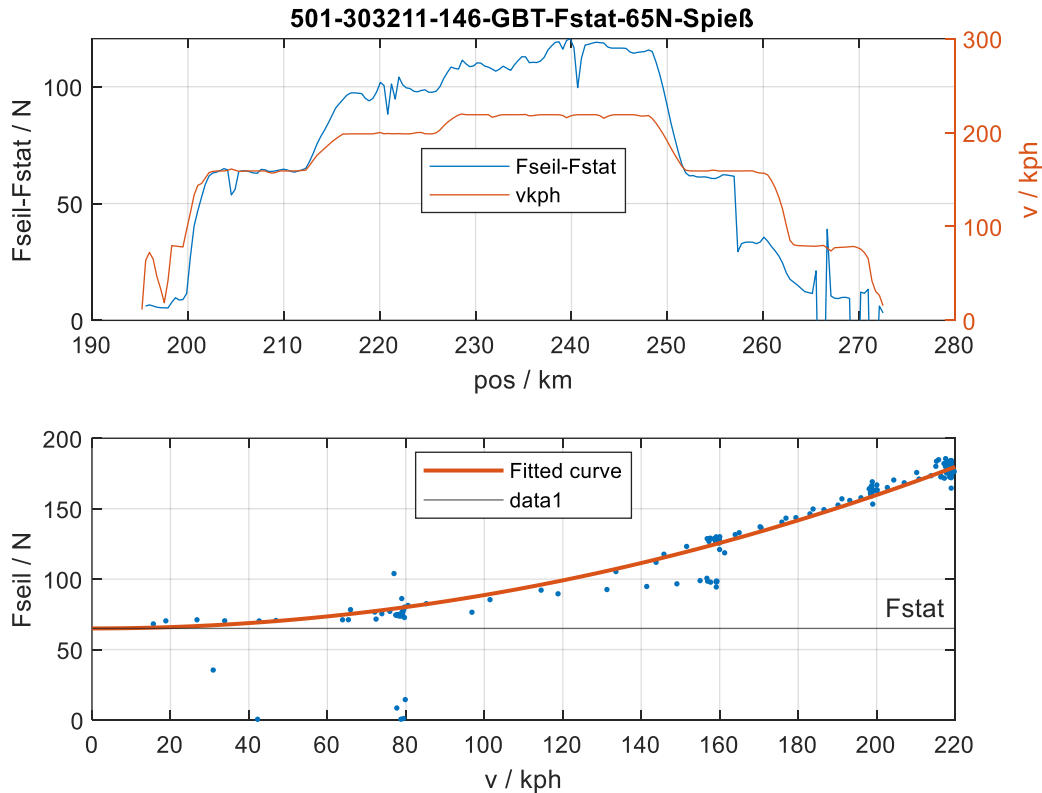


Abbildung 9: Ermittlung der aerodynamischen Kraftkomponente $F_{\text{seil}} - F_{\text{stat}}$

Für unterschiedliche Zugtypen (vgl. Kapitel 3.1) in den beiden Tunneln LBT und GBT wird diese Seilkraft nun miteinander verglichen. Es stehen Messungen von vier Messzügen zur Verfügung. Die Seilmessungen zeigen Unterschiede hinsichtlich:

- Zugtyp und Zugzusammenstellung
- Richtung des Stromabnehmers (Spieß, Knie)
- Stromabnehmertyp
- Tunnel (LBT, GBT)

Ist der aerodynamische Einfluss in LBT und GBT vergleichbar hoch oder unterscheidet sich dieser in den beiden Tunneln signifikant voneinander?

Die ermittelten aerodynamischen Kräfte (Abbildung 10) sind in den beiden Tunneln meist ähnlich hoch (Ausnahme: RABe 501 in Spieß im GBT deutlich höher) und tendenziell im GBT etwas größer als im LBT. Einzig für den P2 des gDFZ in Knie-Richtung wurde im LBT eine höhere Kraft als im GBT festgestellt. Es zeigt sich, dass die Gangart eines Pantographen großen Einfluss auf die aerodynamische Kraft hat. Die Unterschiede sind im Vergleich meist größer als die Unterschiede einer

Gangart zwischen den Tunneln (Unterschied Spieß/Knie größer als LBT/GBT). Vergleicht man die einzelnen Messzüge miteinander, so sind deutliche Unterschiede erkennbar: Abhängig vom Stromabnehmertyp (Richard, Stemmann, Schunk, Faiveley), -richtung (Knie, Spieß) und dessen Positionierung im Zugverband, der Fahrzeugkonfiguration (Einfach- oder Doppeltraktion, Lok/HGV, Wagen) und Tunnel (LBT, GBT) variiert die aerodynamische Kraft von wenigen Newton bis zu über 100 Newton zusätzlichem Auftrieb. Aber auch bei sonst gleichen Prämissen (gDFZ) zeigen sich unterschiedliche Fadenkräfte in den beiden Tunneln.

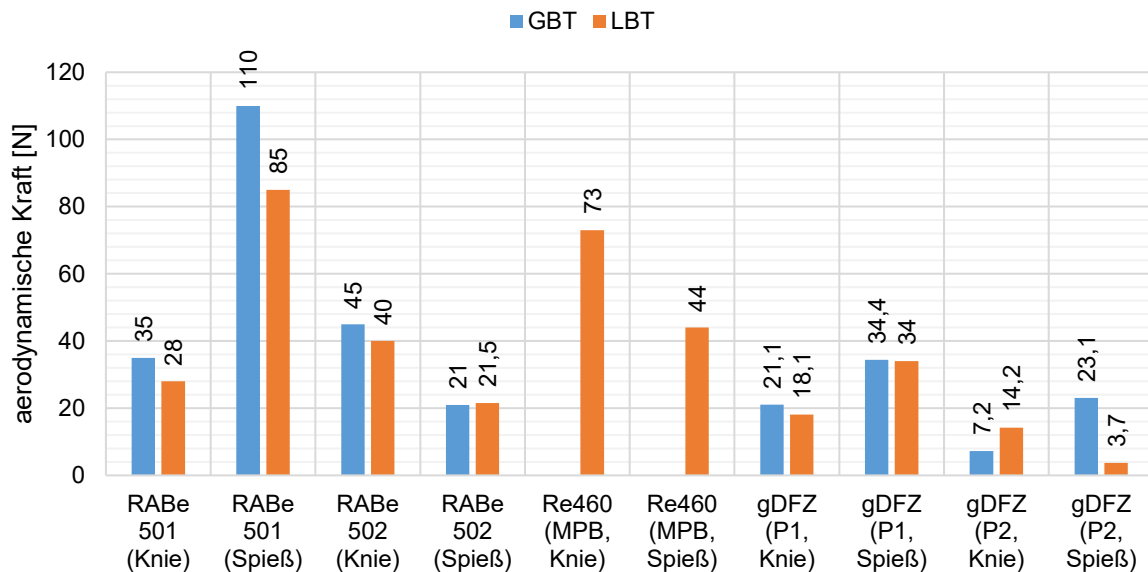


Abbildung 10: Vergleich aerodynamischer Kraftkomponenten verschiedener Fahrzeug- und Stromabnehmerkonfigurationen

Abbildung 10 hat gezeigt, dass die aerodynamischen Einflüsse stark variieren. Naheliegender wäre zu vermuten, dass in Konfigurationen mit besonders hohen aerodynamischen Kräften auch höhere dynamische Kontaktkräfte messbar sind. Dies ist so in den vorliegenden Kontaktkraftmessungen nicht ersichtlich, beispielsweise wenn man den **RABe 501** analysiert. Die deutlich höheren aerodynamischen Kräfte in Spießrichtung (85 N) im Vergleich zur Knierichtung (28 N) zeigen sich nicht in wesentlich höheren mittleren Kontaktkräften. Im untersuchten Geschwindigkeitsbereich von 160 bis 220 km/h lagen die gemessenen mittleren Kontaktkräfte für beide Stromabnehmerrichtungen im Bereich von 90 bis 110 N (blaue Linie in Abbildung 11). Die globalen Kontaktkraftmaxima und -minima im untersuchten Streckenbereich lagen für beide Stromabnehmerrichtungen auf ähnlich hohem Niveau. Diese qualitativen Aussagen gelten analog auch für den GBT (Abbildung 12). Insgesamt liegt das mittlere Kontaktkraftniveau als auch die maximale Kontaktkraft im GBT über dem des LBT. Vor allem bei höheren Fahrgeschwindigkeiten (200 km/h und mehr) steigt die maximale Kontaktkraft deutlich an.

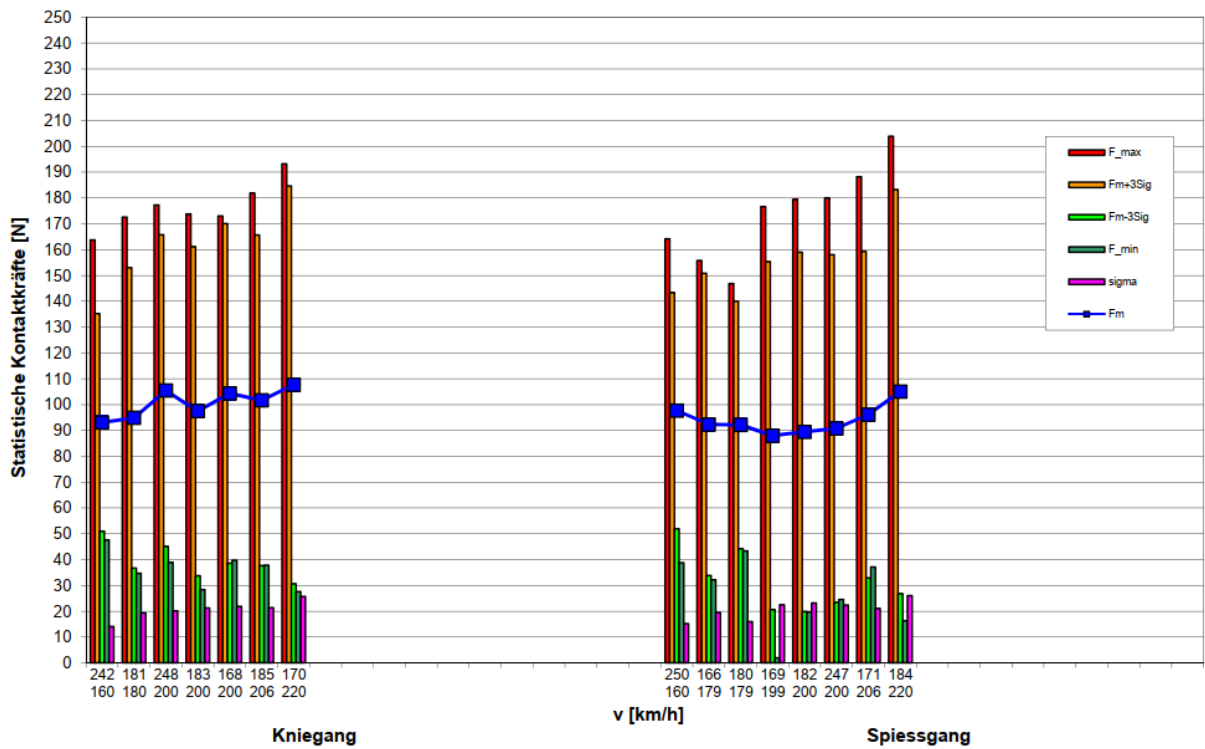


Abbildung 11: Kontaktkraftmessung RABe 501 (Einfachtraktion), LBT

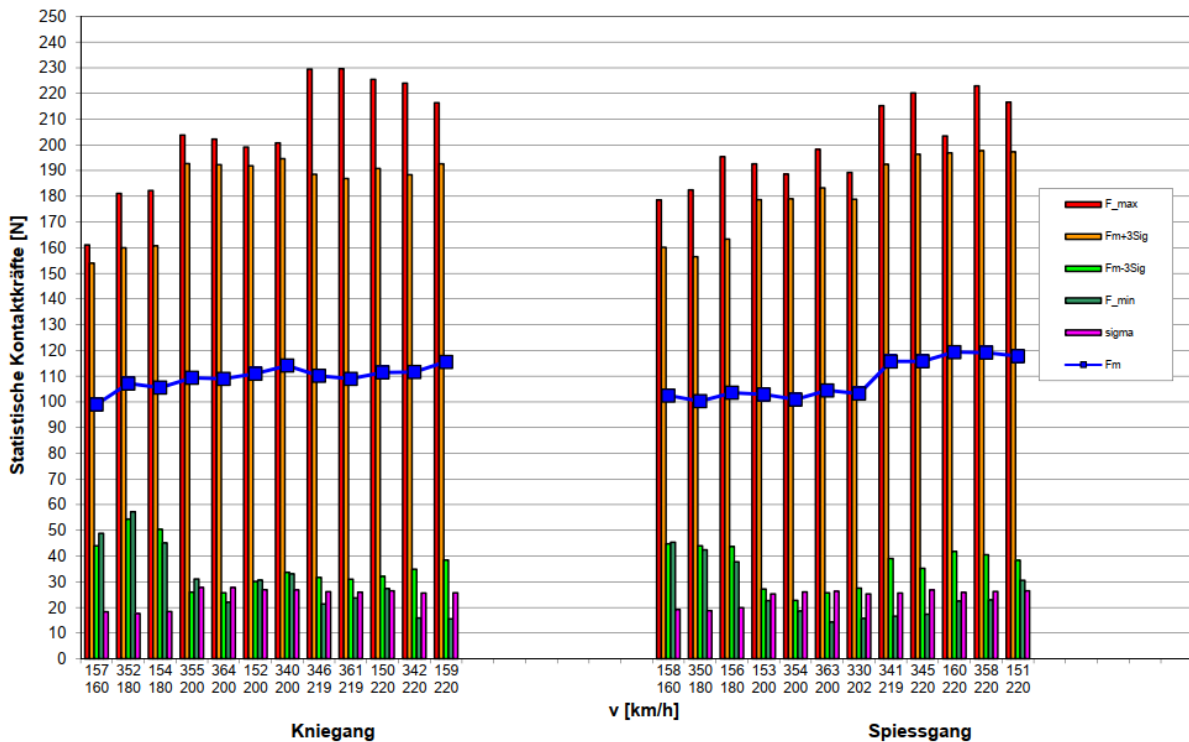


Abbildung 12: Kontaktkraftmessung RABe 501 (Einfachtraktion), GBT

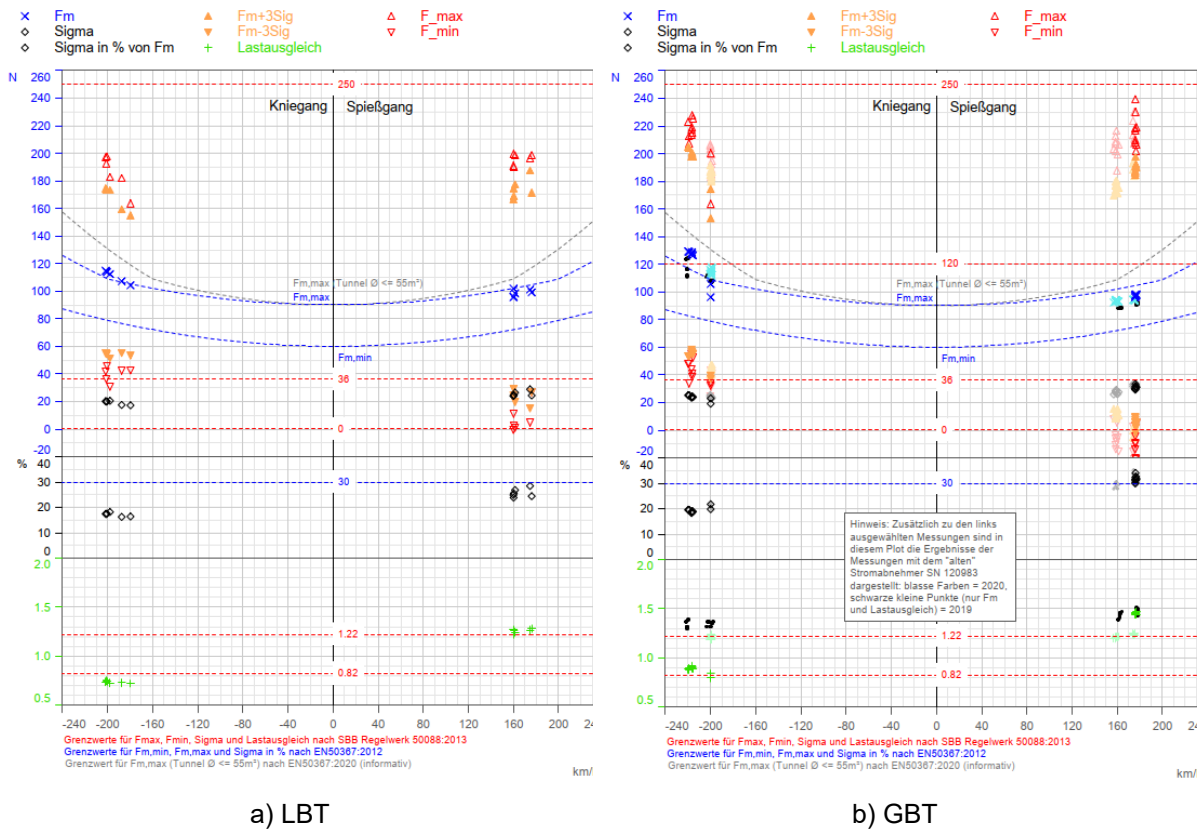


Abbildung 13: Kontaktkraftmessung RABe 502 (Doppeltraktion)

Ein ähnlicher Zusammenhang zeigt sich bei Analyse des **RABe 502** in Abbildung 13. Die ermittelte aerodynamische Kraftkomponente war in Knierichtung etwas höher als in Spießrichtung (40 N zu 21,5 N im LBT). Hingegen zeigen die Kontaktkraftmessungen ähnlich hohe Werte für die mittlere Kontaktkraft. Die Einzelmessungen in Abbildung 13 sind teilweise nicht direkt vergleichbar, da die Messungen bei verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten durchgeführt wurden. Weiterhin überlagern sich Einflüsse aufgrund des zweiten Stromabnehmers.

Wenn hohe Fadenkräfte gemessen werden (d.h. hohe aerodynamische Kraftkomponenten), sind dann auch hohe mittlere Kontaktkräfte messbar?

Die beispielhafte Auswertung von Seilkraft- und Kontaktkraftmessungen für zwei Zugkonfigurationen zeigt keinen direkten Zusammenhang zwischen der aerodynamischen Kraftkomponente und der mittleren Kontaktkraft. Tendenziell steigt das dynamische Kontaktkraftniveau mit stärkerem Auftrieb, aber nicht in dem Maße wie es die Seilkräfte anzeigen.

3.3 Charakteristika im Kontaktkraftverlauf

Im folgenden Kapitel werden Kontaktkraftverläufe (Kontaktkraft über dem Weg) untersucht. Hierzu werden die Rohdaten von Kontaktkraftmessungen des gezogenen Diagnosefahrzeuges ausgewertet. Abbildung 14 zeigt diese im Streckenabschnitt km 40,5 bis 41,5 des LBT sowohl in Spieß- als auch in Knierichtung und in verschiedenen Geschwindigkeiten. Die Kontaktkraft schwankt über dem Weg zwischen

mehreren **lokalen Minima** und **Maxima**. Die lokalen Maxima zeigen sich in der Nähe der Stützpunkte, während die lokalen Minima in Feldmitte auftreten.² Dies entspricht der Erwartungshaltung und wurde auch in Simulationen nachgewiesen [D6]. Es scheint, als wären diese lokalen Extrempunkte im Kettenwerk **ortsfest**, sowohl hinsichtlich der Fahrgeschwindigkeit als auch bezüglich der Stromabnehmerrichtung. Die **absoluten Kontaktkraftextrema** je Messfahrt variieren in der Ortsposition.

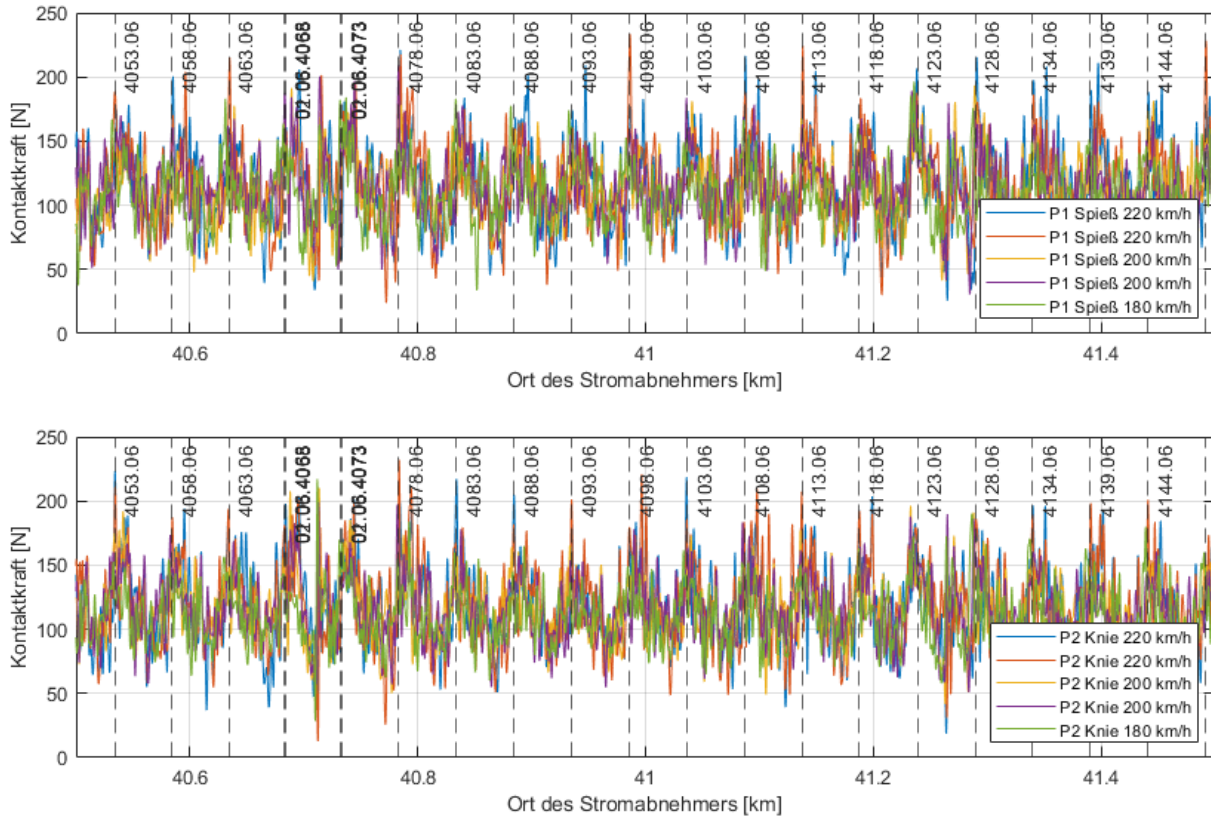


Abbildung 14: Kontaktkraftverläufe im LBT km 40,5-41,5 für das gDFZ mit den Gangarten P1 Spieß und P2 Knie für verschiedene Geschwindigkeiten, Fahrtrichtung Frutigen nach Visp

Die Einzelmessungen zeigen zwar einen stark dynamischen Kontaktkraftverlauf, dieser schwingt jedoch um eine in allen Messungen gleichbleibende Grundschwingung. Gut sichtbar ist das z.B. in [D7], bei der die Kontaktkraft gesondert auch als gleitender Mittelwert dargestellt wird. Diese grundlegende Schwingung wird im Wesentlichen durch den Stützpunktabstand und den niedrigsten Eigenfrequenzen bestimmt.

Bei Betrachtung der Bereiche in Feldmitte lässt sich ein höherer Frequenzanteil im Kraftverlauf erkennen, der durch die einzelnen Hänger entsteht.

Im Bereich des Streckenkilometers km 40,7 befindet sich eine **Überlappung** im Kettenwerk. Abbildung 15 zeigt diesen Bereich in vergrößerter Darstellung. Auffällig

² Die Stützpunkte entsprechen den gestrichelten vertikalen Linien in Abbildung 14 und basieren auf Daten der Ausführungsplanung. Abweichungen zur realen Ortskoordinate sind dem tatsächlichen Einbau der Stützpunkte sowie Unsicherheiten bei der Positionsbestimmung je Messung bedingt.

sind die Kontaktkraftextrema in der Mitte der Überlappung, wo der Stromabnehmer zwischen den Fahrdrähten der Kettenwerke wechselt. Der Anstieg der Kraft ist hier deutlich höher als an den Maxima der Stützpunkte.

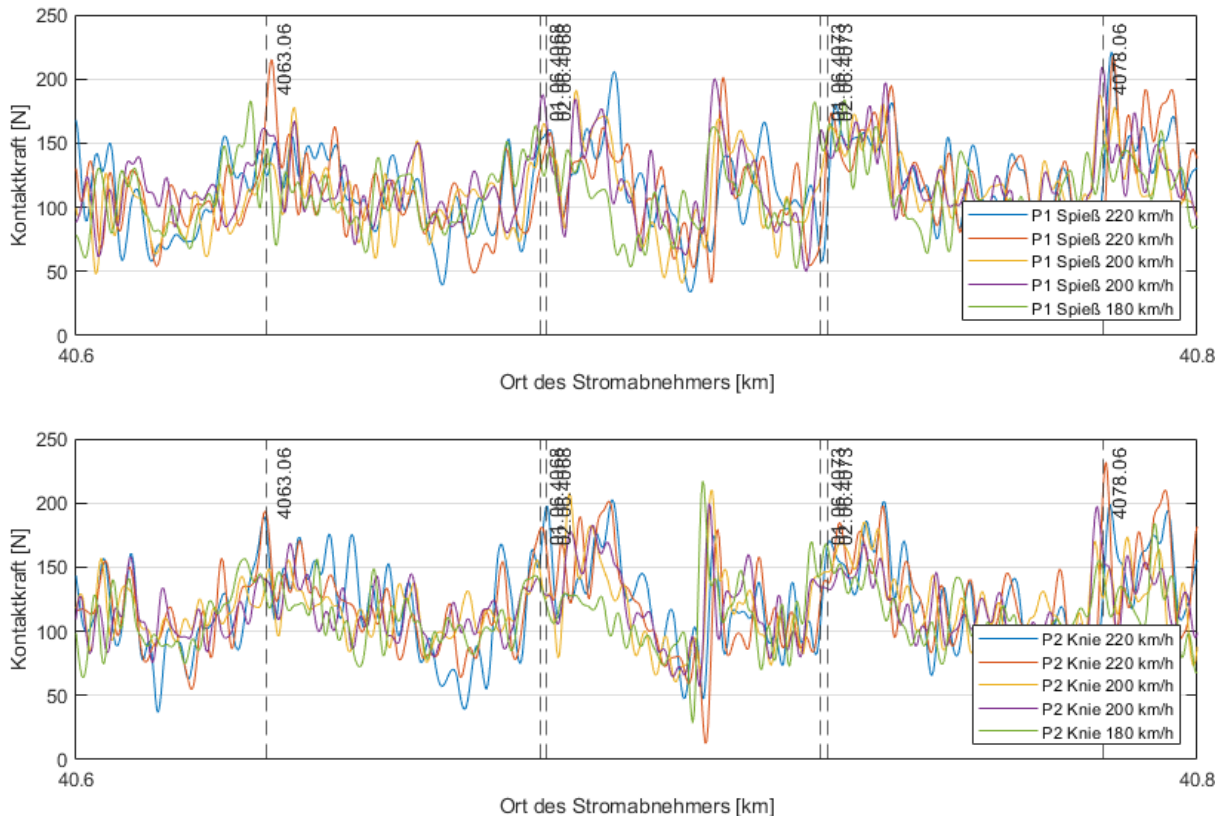


Abbildung 15: Kontaktkraftverläufe im LBT an der Überlappung für das gDFZ mit den Gangarten P1 Spieß und P2 Knie für verschiedene Geschwindigkeiten

Ein weiterer auffälliger Bereich mit hohen Kontaktkraftextrema befindet sich um den **Festpunkt** am Stützpunkt 4123.06 herum (Abbildung 16). Ähnlich wie in der Kettenwerksüberlappung zeigen sich weitere lokale Kontaktkraftextrema. Diese könnten auf Variationen im Kettenwerk hinweisen, z.B. durch Befestigungen des Z-Seils. Bei Messungen in entgegengesetzter Fahrtrichtung befindet sich die Kraftspitze im linken Feld des Festpunktes. Auch hier zeigen die Kraftverläufe eine hohe Änderungsrate.

Gibt es charakteristische Kontaktkraftverläufe für die beiden OLA? Ist eine Wiederholbarkeit der Messungen sichtbar, z.B. hinsichtlich Positionen lokaler Maxima?

Eine charakteristische Grundschiwingung ist in allen Messungen sehr gut sichtbar. Diese ist unabhängig von der Fahrgeschwindigkeit als auch der Stromabnehmerichtung, muss also durch den Aufbau der Oberleitung bestimmt sein. Die Kontaktkraftschwingung pendelt zwischen annähernd ortsfesten lokalen Extrempunkten. Globale Extremstellen treten vor allem an besonderen Stellen im Kettenwerk wie Festpunkten oder Überlappungen auf.

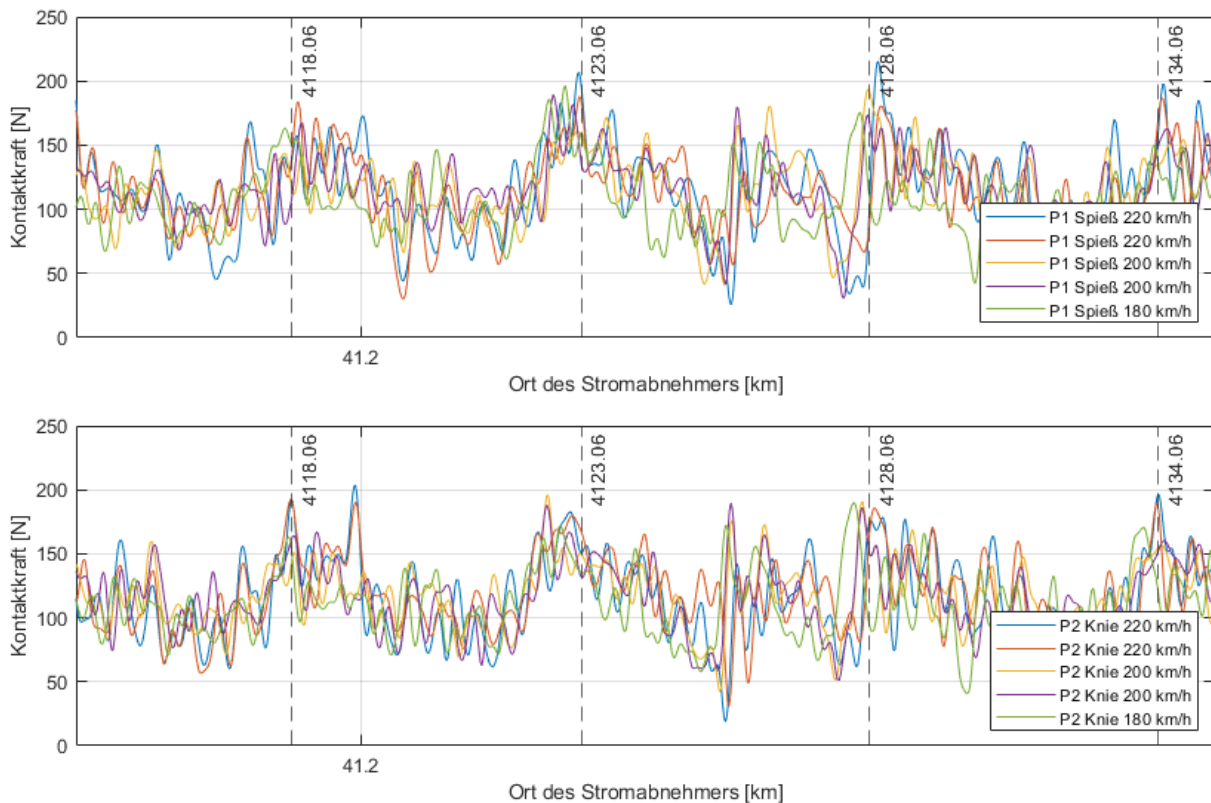


Abbildung 16: Kontaktkraftverläufe im LBT am Festpunkt für das gDFZ mit den Gangarten P1 Spieß und P2 Knie für verschiedene Geschwindigkeiten

3.4 Statistische Kontaktkraftwerte (gDFZ)

Die Auswertung der Kontaktkraftverläufe in Kapitel 3.3 hat gezeigt, dass vergleichende Aussagen zwischen LBT und GBT nur sinnvoll sind, wenn die betriebliche Belastung der Oberleitung identisch ist. Daher werden im Folgenden nur Messfahrten des gezogenen Diagnosefahrzeuges ausgewertet. Für diesen Zug standen umfangreiche Kontaktkraftdaten zur Verfügung. Ausgewertet werden Messfahrten mit verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten (180, 200, 220 km/h), Fahrtrichtungen und Pantographen (P1, P2). Auf Basis dieser soll nachfolgend zwei Analysen durchgeführt werden:

- Vergleich der Kontaktkräfte zwischen LBT und GBT unter gleichen Prämissen,
- sowie Einfluss einer höheren mittleren Kontaktkraft (F_m) auf Kontaktkraftextrema (F_{max} , F_{min}) und Standardabweichung (σ).

Innerhalb der Tunnelstrecken des LBT sowie des GBT sind sogenannte Referenzabschnitte definiert. Sie werden definiert, um verschiedene Messungen vergleichen zu können. Innerhalb dieser unterschiedlich langen Oberleitungsbereiche werden statistische Kenngrößen ermittelt und zur Bewertung herangezogen. Die Referenzabschnitte bilden neben normalen Fahrleitungsabschnitten auch verschiedene kritische Bereiche der Oberleitung ab wie Spurwechsel oder eine Schutzstrecke.

Alle nachfolgenden Aussagen beziehen sich auf die Auswertung des gezogenen Diagnosefahrzeuges (gDFZ) in **Einfachtraktion**.

Zunächst werden verschiedene Messungen **bei 200 km/h** ausgewertet. Abbildung 17 zeigt die mittlere Kontaktkraft F_m , die Streuung σ sowie die maximale Kontaktkraft F_{max} in verschiedenen Referenzabschnitten von GBT und LBT. Die Säulen auf der linken Seite wurden mit Pantograph 1 (P1) aufgenommen. Rechts davon befinden sich die Werte des Pantograph 2 (P2). Für die Fahrten hatte das Messfahrzeug immer die gleiche Orientierung, sodass die Gangarten der Pantographen die Fahrtrichtungen nach Tabelle 6 aufzeigten.

Tabelle 6: Übersicht Fahrt- und Stromabnehmerrichtungen gDFZ

Tunnel	Fahrtrichtung	P1	P2
LBT	Frutigen nach Visp	Spieß	Knie
	Visp nach Frutigen	Knie	Spieß
GBT	Flüelen nach Osogna (Oströhre)	Spieß	Knie
	Osogna nach Flüelen (Weströhre)	Knie	Spieß

In allen Messungen ist die mittlere Kontaktkraft F_m als auch die Standardabweichung der Kontaktkraft σ über die einzelnen Wiederholungsmessungen hinweg betrachtet annähernd gleich hoch. Diese beiden Größen sind statistisch eher stabil im Unterschied zur maximalen Kontaktkraft F_{max} . Hier können zwischen einzelnen Messungen sehr große Unterschiede von bis zu 31 N (LBT, P1 Knie, km 40.5 – 41.5) festgestellt werden. Die höchsten maximalen Kontaktkräfte sind im GBT aufgetreten.

Auffällig ist auch, dass in der gleichen Zugkonfiguration unterschiedlich hohe Kontaktkräfte in den Tunneln GBT und LBT gemessen werden. Es also einen zusätzlichen Einfluss durch die konkrete Oberleitung oder des Tunnelsystems (z. B. Tunnelquerschnitt) gibt. Abbildung 10 zeigte, dass die aerodynamischen Kraftkomponenten für P1 in LBT und GBT annähernd gleichhoch sind, wohingegen bei P2 starke Unterschiede zwischen den Tunneln gemessen wurden. Hingegen zeigen die Kontaktkraftmessungen in Abbildung 17 kein ähnliches Messergebnis für P1 in LBT und GBT.

Die höchsten aerodynamischen Kräfte wurden in der Variante P1/Spieß für LBT und GBT gemessen. Jedoch zeigt diese Variante nur im LBT ein hohes mittleres Kontaktkraftniveau. Ähnlich hoch ist dieses Kontaktkraftniveau auch in der Variante P2/Knie im LBT und P2/Spieß im GBT.

Die berechnete Standardabweichung der Kontaktkraft σ ist im GBT stets deutlich höher als im LBT – teilweise bis zu 10 N. Hier scheint also eine Unabhängigkeit vom Stromabnehmer vorzuliegen. Insgesamt ist die Standardabweichung der Kontaktkraft jedoch unabhängig von der mittleren Kontaktkraft, sowohl im LBT als auch GBT.

Die mittlere und die maximale Kontaktkraft ist im LBT in der Richtung Frutigen nach Visp höher als in der Gegenrichtung. Ein ähnliches richtungsabhängiges Verhalten kann im GBT nicht festgestellt werden. Obwohl die in der Weströhre gemessenen mittleren Kontaktkräfte am höchsten waren, sind die maximalen Kontaktkräfte in der Variante P2/Spieß die geringsten aller Kontaktkraftmaxima im GBT.

Tendenziell sind mit höheren mittleren Kontaktkräften auch höhere maximale Kontaktkräfte messbar. Ausnahme bildet die bereits erwähnte Variante P2/Spieß.

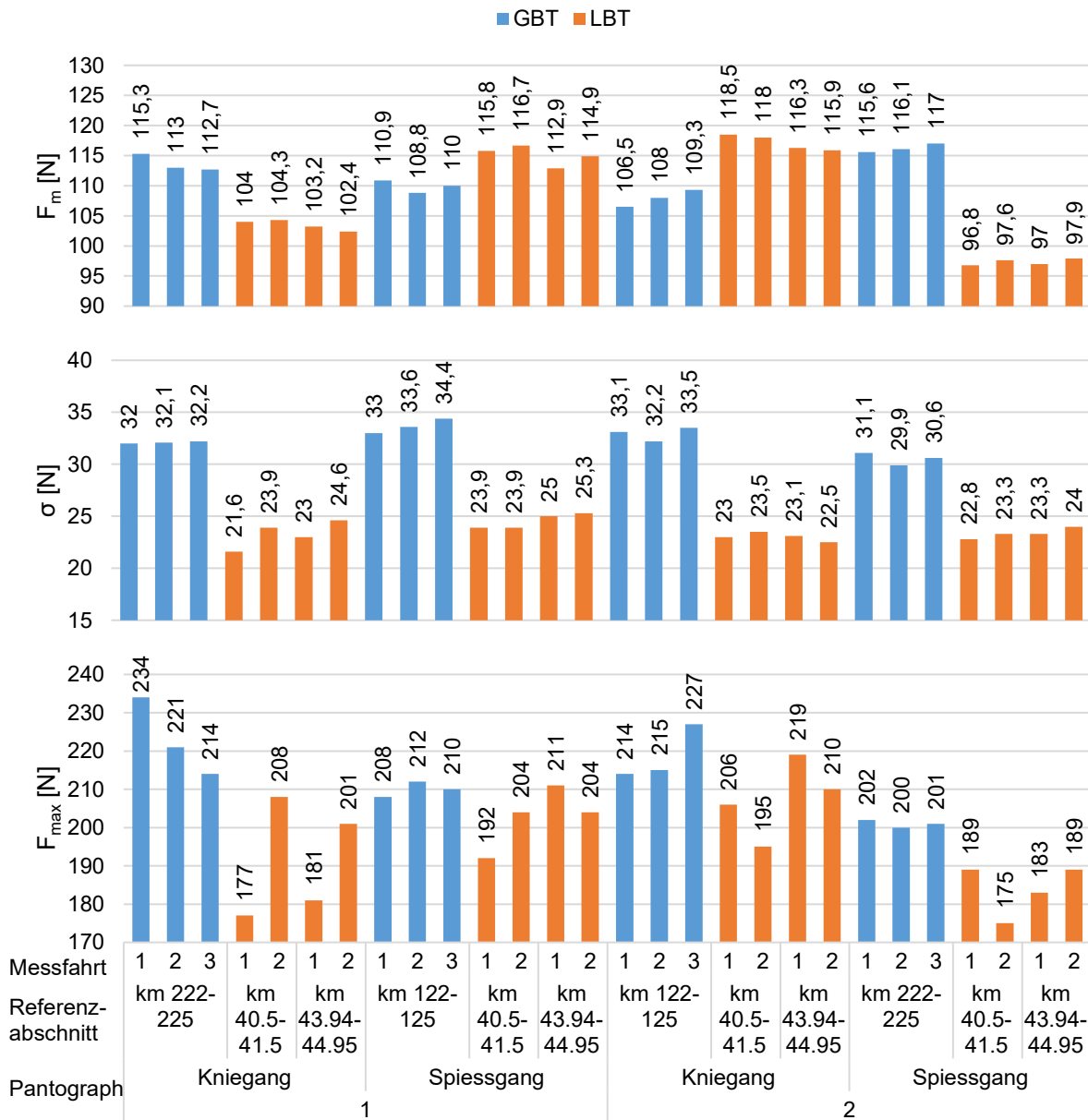


Abbildung 17: Vergleich statistischer Kontaktkraftwerte für das gDFZ bei einer Geschwindigkeit von 200 km/h im GBT und LBT

Eine etwas andere Darstellungsart wurde in Abbildung 18 und Abbildung 19 gewählt: Hierbei wurden die maximale Kontaktkraft und die Standardabweichung der Kontaktkraft über der mittleren Kontaktkraft aufgetragen. Jeder Datenpunkt steht für eine einzelne Auswertung. Je Tunnel wurden die Messfahrten in gleiche Fahrtrichtung zusammengefasst auszuschließen. Entsprechend sind zwei Datenpunkte sichtbar, wenn die Messfahrt in zwei Referenzabschnitten ausgewertet wurde. Die farbliche Unterscheidung entspricht in der linken Spalte der Fahrgeschwindigkeit (160-220 km/h) und in der rechten Spalte dem Stromabnehmer (P1, P2) des Messzuges.

Wie obige Auswertung gezeigt hat, steigt die maximale Kontaktkraft tendenziell mit der mittleren Kontaktkraft an. Um dies zu quantifizieren, wurde eine Regressionsgerade

ergänzt. Der zugehörige Anstieg der Geraden $\Delta F_{max}/\Delta F_m$ beschreibt, wie stark sich im Mittel die maximalen Kontaktkräfte bei Änderung der mittleren Kontaktkraft erhöhen. Für beide Tunnel gibt es eine Fahrtrichtung, bei der dieses rein empirische Maß mehr als doppelt so hoch ist, als in der anderen Fahrtrichtung. Der höchste Anstieg wurde im LBT in der Richtung Frutigen nach Visp mit 2,32 und für den GBT von Osogna nach Flüelen mit 1,67 ermittelt. Der niedrigste Anstieg betrug 0,76. Mit diesen Werten würde eine Erhöhung der mittleren Kontaktkraft um 10 N eine Erhöhung der maximalen Kontaktkraft von minimal 7,6 N bis zu maximal 23,2 N ergeben.

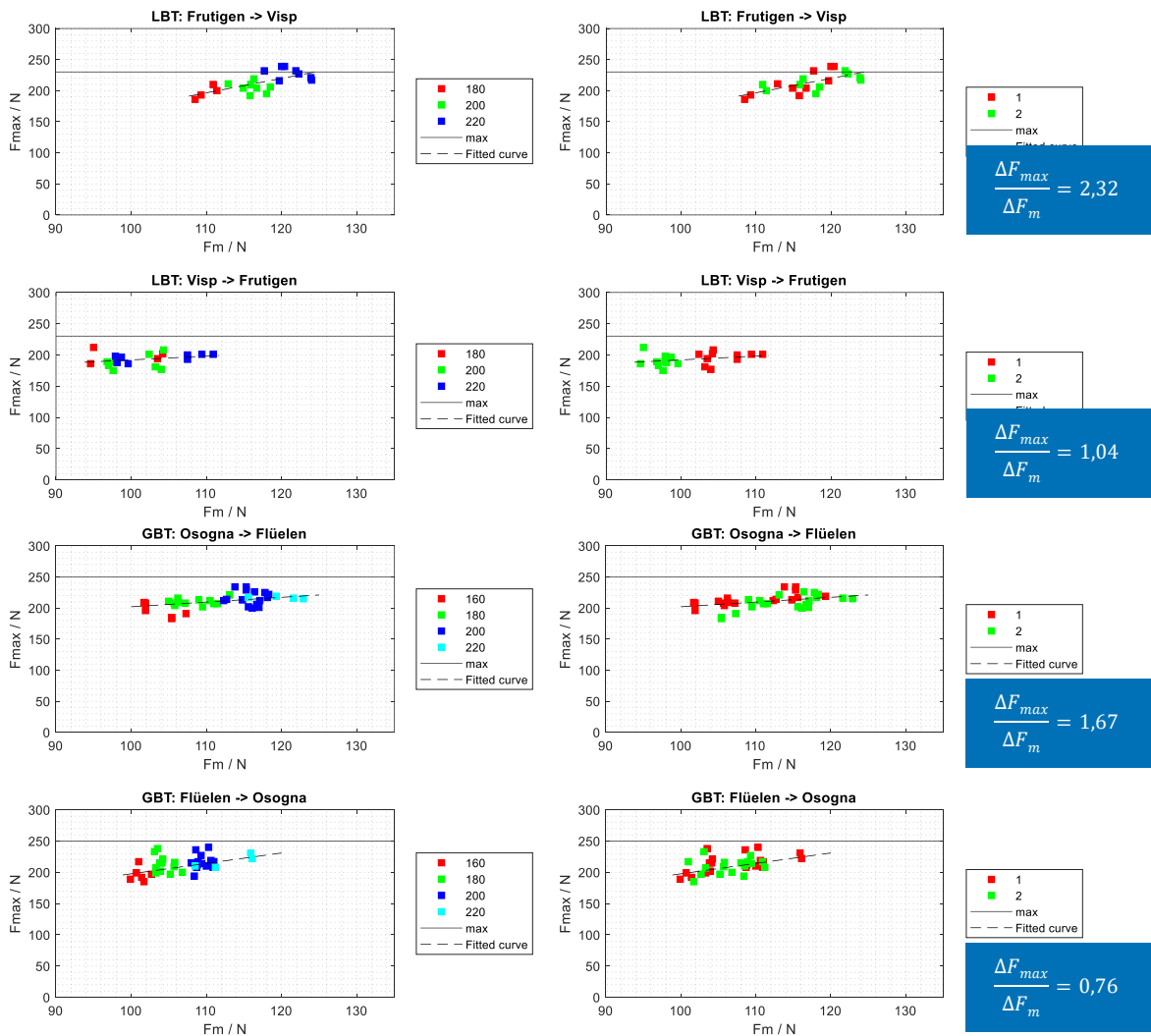


Abbildung 18: Darstellung von maximaler zu mittlerer Kontaktkraft

Bei Betrachtung der Standardabweichung der Kontaktkraft in Abbildung 19 zeigen sich etwas andere Zusammenhänge. Wie bereits in Abbildung 17 gezeigt, ist die Abhängigkeit zur Fahrgeschwindigkeit deutlich stärker vorhanden: Höhere Fahrgeschwindigkeiten erzeugen höhere Standardabweichungen der Kontaktkraft. Der Einfluss ist im LBT ab 200 km/h und im GBT bereits ab 180 km/h sichtbar. Bis dahin ändert sich die Standardabweichung der Kontaktkraft kaum. Auf eine zusätzliche Regressionskurve in den Diagrammen wurde daher verzichtet.

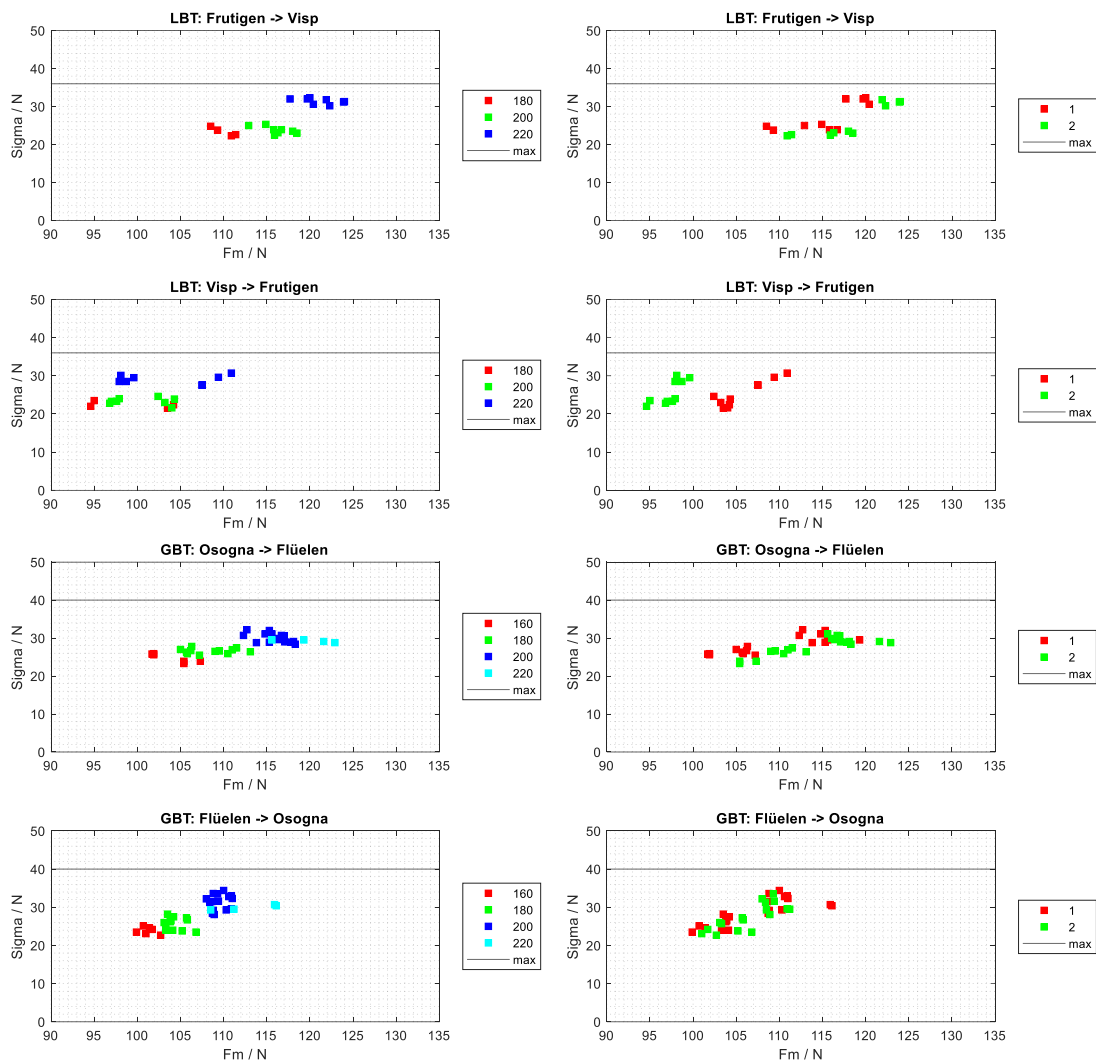


Abbildung 19: Darstellung von Standardabweichung zu mittlerer Kontaktkraft

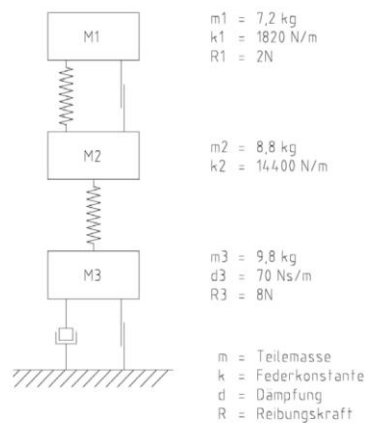
Kann auf Basis der vorhandenen Messdaten prognostiziert werden, wie eine höhere mittlere Kontaktkraft sich auf den Kontaktkraftverlauf auswirken würde?

- Da die mittlere Kontaktkraft F_m von der Fahrgeschwindigkeit abhängt (Aerodynamik), muss dieser Effekt bei der Auswertung der Messungen berücksichtigt werden. Hierzu ist die Zusammenfassung und Visualisierung von Einzelmessungen hilfreich.
- Im LBT und GBT zeigen sich lineare Zusammenhänge zwischen Kontaktkraftmaximum (F_{max}) und F_m . Je nach Fahrtrichtung sind diese verschieden stark ausgeprägt.
- Die Standardabweichung der Kontaktkraft σ ist abhängig von der Ausführung der Oberleitung (z.B. LBT oder GBT) und der Fahrgeschwindigkeit. Bei höheren Fahrgeschwindigkeiten steigt sie signifikant an. Im GBT etwas eher (180 km/h) als im LBT (200 km/h). Der Einfluss der mittleren Kontaktkraft F_m ist deutlich kleiner als der Einfluss der Fahrgeschwindigkeit.

4 Dynamiksimulation

4.1 Modellbildung, Parametrierung und Validierung

In Ergänzung des Vergleichs konstruktiver Parameter und dynamischer Kennwerte für der Oberleitungen in LBT und GBT aus Kapitel 2.3 werden dynamische Simulationen der Interaktion von Stromabnehmer und Fahrdrabt durchgeführt. Hierzu wurden die Oberleitungen von LBT und GBT in einem dafür geeigneten und validierten Berechnungstool modelliert [12]. Anschließend erfolgte eine Validierung des Modells mit Eingangsdaten und Ergebnissen nach [D6]. Alle konstruktiven Parameter der beiden verschiedenen Kettenwerke sind in Kap. 2.3.1 zusammengefasst. Es wurde eine Nachspannlänge modelliert. Diese besteht aus 17 Stützpunkten mit einem gleichmäßigen Abstand von 50 m. Die Dämpfung der Oberleitung wird nach EN 50318 als strukturelle Dämpfung berücksichtigt und parametrierung. Der Stromabnehmer ist als 3-Massen-Modell implementiert und wird nach Abbildung 20 parametrierung.



RM 350/355 SBB		
3-Massen-Modell	1:1	
RICHARD MURGENTHAL		JR 200525
<small>RICHARD AG MURGENTHAL Maschinen- & Apparatebau CH-4853 Murgenthal</small>		

Abbildung 20: Drei-Massen-Feder-Dämpfermodell RM 350/355 SBB

4.2 Randbedingungen und untersuchte Szenarien

Wie in Kapitel 2.1 gezeigt, ergibt sich die Gesamtanpresskraft am Stromabnehmer aus verschiedenen Kraftanteilen. In Übereinstimmung mit dem Studienziel (Kapitel 1.1) soll nun in den Simulationen untersucht werden, welche Auswirkungen sich durch eine Erhöhung der mittleren Kontaktkraft F_m ergeben. Im physikalischen Sinne ist F_m eine resultierende Bewertungsgröße, die sich aus den Momentanwerten des Kontaktkraftverlaufes durch Mittelwertbildung berechnen lässt (Kapitel 2.1). Als Eingangsgröße für die Simulation dient hingegen die Vorgabe von statischer (F_{stat}) und aerodynamischer (F_{aero}) Kraftkomponente. Nach Kapitel 7.3 in EN 50367, muss die Oberleitung „so ausgelegt werden, dass mindestens der [...] maximale Mittelwert der Kontaktkraft ($F_{m,max}$) angenommen wird.“ Nach [D2] sind das 120 N und 130 N. Wenn die Kontaktkraft nun mittig um die durch den Stromabnehmer eingepreiste Kraft schwankt, dann ergibt sich F_m aus $F_{stat} + F_{aero}$. Mit diesem Wissen lassen sich die Auswirkungen einer erhöhten mittleren Kontaktkraft simulativ umsetzen. In den

Simulationsläufen beträgt die **statische Anpresskraft** $F_{\text{stat}}=75 \text{ N}$. Die **aerodynamische Kraftkomponente** wird einmal mit $F_{\text{aero}}=45 \text{ N}$ und einmal $F_{\text{aero}}=55 \text{ N}$ angesetzt. Dies ergibt eine aerodynamische Gesamtanpresskraft von $F_{\text{stat+aero}} = 120 \text{ N}$ bzw. $F_{\text{stat+aero}} = 130 \text{ N}$.

Neben der Stromabnehmerkraft werden weitere Parameter untersucht. Um deren Einfluss zu bestimmen, werden diese systematisch variiert und in verschiedenen Szenarien zusammengefasst. Untersucht wurden sind:

- **Kettenwerksausführung:**

Variation des Oberleitungstyps Typ LBT und Typ GBT

- **Anzahl der Stromabnehmer:**

Untersuchung des Einzelbetriebs (ein Stromabnehmer) sowie des Doppelbetriebs (zwei Stromabnehmer)

- **Stromabnehmerabstand:**

Variation des Abstands zwischen den beiden Stromabnehmern mit den Werten $s = 0 \text{ m}$, $s = 18,5 \text{ m}$ und $s = 185 \text{ m}$

Für sämtliche Szenarien beträgt die Fahrgeschwindigkeit **$v=200 \text{ km/h}$** . Als Stromabnehmer kommt stets der Typ **RM 350/355** von Richard AG Murgenthal zum Einsatz (siehe Abbildung 20).

Die Auswertung der Simulationsergebnisse erfolgte anhand der Charakterisierung der Kontaktkraft zwischen Stromabnehmer und Fahrdrabt, sowie des maximalen Anhubes. Gemäß EN 50317 werden statistische Kenngrößen berechnet und mit den Grenzwerten der Netzzugangsbedingungen [D2] verglichen. Folgende Werte werden ausgewertet:

- F_{max} : maximale Kontaktkraft
- F_{min} : minimale Kontaktkraft
- F_{m} : mittlere Kontaktkraft
- σ : Standardabweichung der Kontaktkraft
- u_{max} : maximaler Anhub am Stützpunkt

Diese Parameter ermöglichen eine quantitative Beurteilung der Kontaktqualität und bilden die Grundlage für die Bewertung zur Zulässigkeit der mittleren Kontaktkraft-erhöhung.

4.3 Ergebnisse

Die Darstellungen in Abbildung 21 bis Abbildung 26 zeigen die Ergebnisse von insgesamt 12 Einzelsimulationen. Jede Abbildung zeigt vier Diagramme. In der oberen Zeile sind die Werte für die OLA im LBT dargestellt und die untere Zeile enthält die Werte für die OLA des GBT. Die beiden Diagramme in der linken Spalte zeigen die Werte für den führenden (Panto 1) und in der rechten Spalte die des nachlaufenden Stromabnehmers (Panto 2).

Bei Erhöhung der mittleren Kontaktkraft nehmen in allen Varianten die Kontaktkraftspitzen zu. Die höchste Zunahme (+22,7 N) trat am nachlaufenden Stromabnehmer und langem Stromabnehmerabstand im LBT auf. Die absoluten Zunahmen

(roter Balken im Vergleich zu blauem Balken) sind meist im LBT höher als im GBT (Ausnahme führender Stromabnehmer in kurzem Abstand).

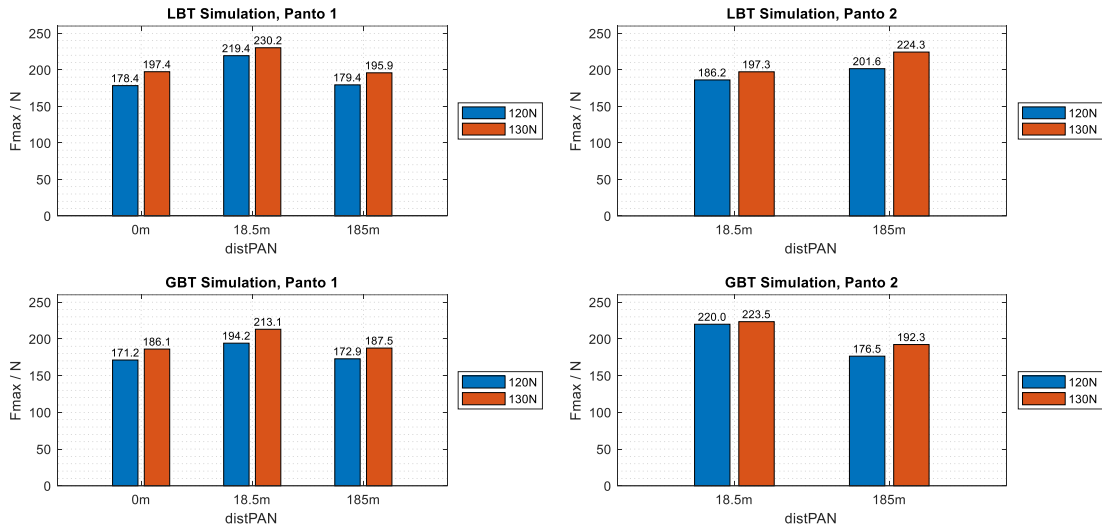


Abbildung 21: Vergleich der maximalen Kontaktkraft F_{max}

Für den führenden Stromabnehmer sind die maximalen Kontaktkräfte sowohl in Einzeltraktion als auch bei Mehrfachstromabnehmerbetrieb im LBT höher als im GBT. Die höchsten Kontaktkraftspitzen am ersten Stromabnehmer treten in beiden Tunneln bei kurzem Stromabnehmerabstand (18,5 m) auf.

Am nachlaufenden Stromabnehmer treten im LBT bei größerem Abstand höhere Kontaktkraftspitzen auf als bei einem kürzeren Abstand. Im GBT zeigt sich dagegen das entgegengesetzte Verhalten.

Die höchsten Kontaktkraftspitzen treten im LBT auf. Der höchste Wert aller Einzelsimulationen zeigt sich für den führenden Stromabnehmer in kurzer Stromabnehmerdistanz (18,5 m) und einer mittleren Kontaktkraft von 130 N.

Der Grenzwert von 230 N wird nur bei kurzer Stromabnehmerdistanz und einer mittleren Kontaktkraft von 130 N minimal überschritten (230,2 N).

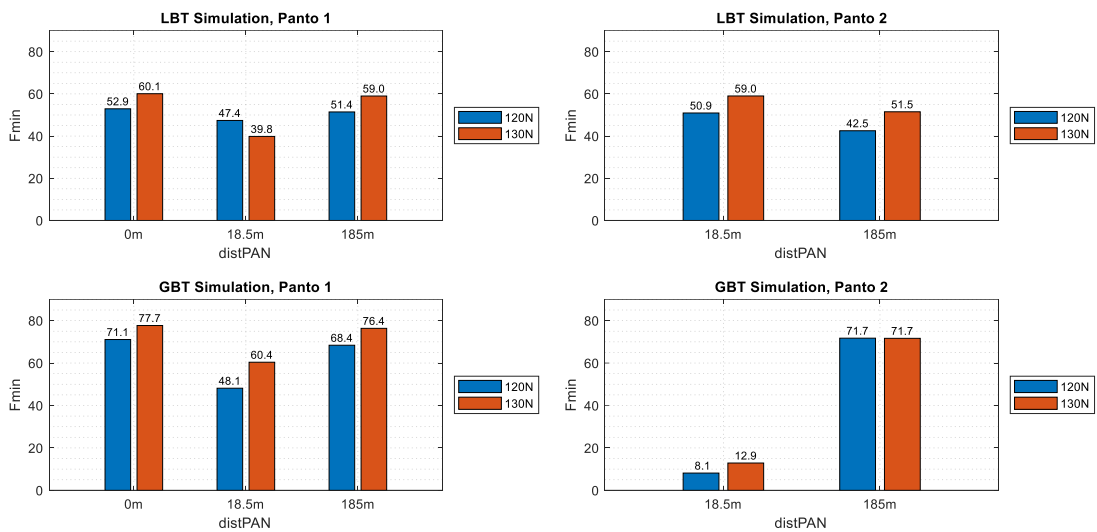


Abbildung 22: Vergleich der minimalen Kontaktkraft F_{\min}

Bei Erhöhung der mittleren Kontaktkraft nimmt das **Kontaktkraftminimum** in fast in allen Varianten zu: Ausnahme ist der führende Stromabnehmer in kurzer Stromabnehmerdistanz (-7,6 N). Die höchste Zunahme (+12,3 N) trat am führenden Stromabnehmer und kurzem Stromabnehmerabstand im GBT auf. Die absoluten Zunahmen (roter Balken im Vergleich zu blauem Balken) sind meist im LBT höher als im GBT (Ausnahme führender Stromabnehmer in kurzem Abstand).

Bei Einzeltraktion sind die minimalen Kontaktkräfte im LBT fast immer niedriger als im GBT. Bei Mehrfachstromabnehmerbetrieb gilt dies jedoch nicht für den nachlaufenden Stromabnehmer in kurzer Stromabnehmerdistanz. Die niedrigsten Kontaktkraftspitzen am ersten Stromabnehmer treten in beiden Tunneln bei kurzem Stromabnehmerabstand (18,5 m) auf.

Am nachlaufenden Stromabnehmer treten im LBT bei größerem Abstand niedrigere Kontaktkraftminima auf als bei einem kürzeren Abstand. Im GBT zeigt sich dagegen das entgegengesetzte Verhalten.

Die niedrigsten Kontaktkraftminima treten im GBT auf. Der niedrigste Wert aller Einzelsimulationen zeigt sich für den nachlaufenden Stromabnehmer in kurzer Stromabnehmerdistanz (18,5 m) bei einer mittleren Kontaktkraft von 120 N.

Der Grenzwert von 0 N wird in allen Varianten nicht unterschritten.

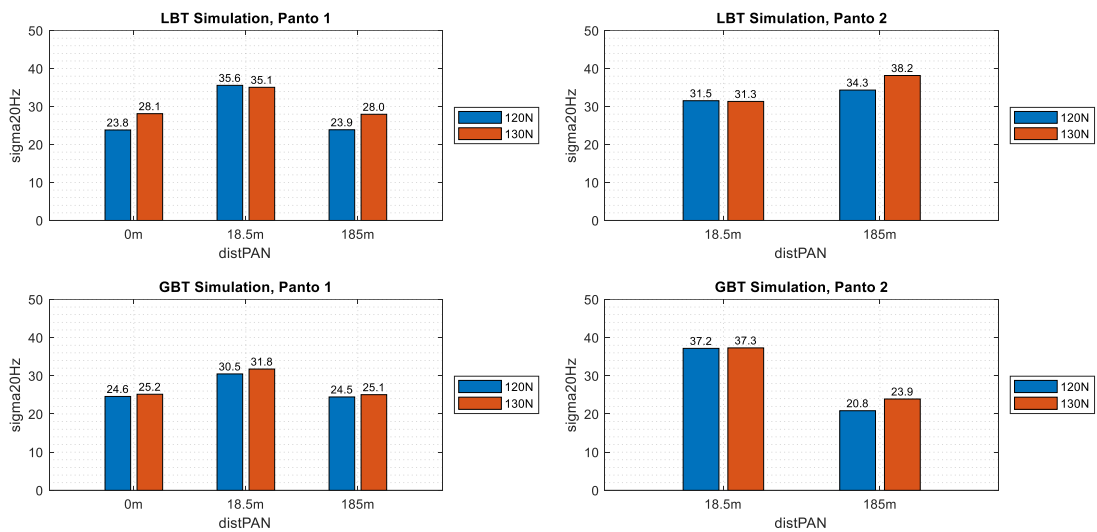


Abbildung 23: Vergleich der Standardabweichung der Kontaktkraft σ

Bei Erhöhung der mittleren Kontaktkraft nehmen in fast allen Varianten die Standardabweichungen der Kontaktkräfte zu: Ausnahme ist der führende Stromabnehmer in kurzer Stromabnehmerdistanz. Die höchste Zunahme (+4,3 N) trat am führenden Stromabnehmer in Einzeltraktion im LBT auf. Die absoluten Zunahmen (roter Balken im Vergleich zu blauem Balken) sind meist im LBT höher als im GBT (Ausnahme führender und nachlaufender Stromabnehmer in kurzem Abstand).

Für den führenden Stromabnehmer sind in den Varianten mit einer mittleren Kontaktkraft von 130 N die Standardabweichungen der Kontaktkräfte im LBT höher als im GBT. Die höchsten Werte am ersten Stromabnehmer treten in beiden Tunneln bei kurzem Stromabnehmerabstand (18,5 m) auf.

Am nachlaufenden Stromabnehmer treten im LBT bei größerem Abstand höhere Standardabweichungen der Kontaktkraft auf als bei einem kürzeren Abstand. Im GBT zeigt sich dagegen das entgegengesetzte Verhalten.

Die höchsten Standardabweichungen der Kontaktkraft treten im LBT auf. Der höchste Wert aller Einzelsimulationen zeigt sich für den nachlaufenden Stromabnehmer in langer Stromabnehmerdistanz (185 m) bei einer mittleren Kontaktkraft von 130 N.

Der Grenzwert von 40 N wird in allen Varianten nicht überschritten.

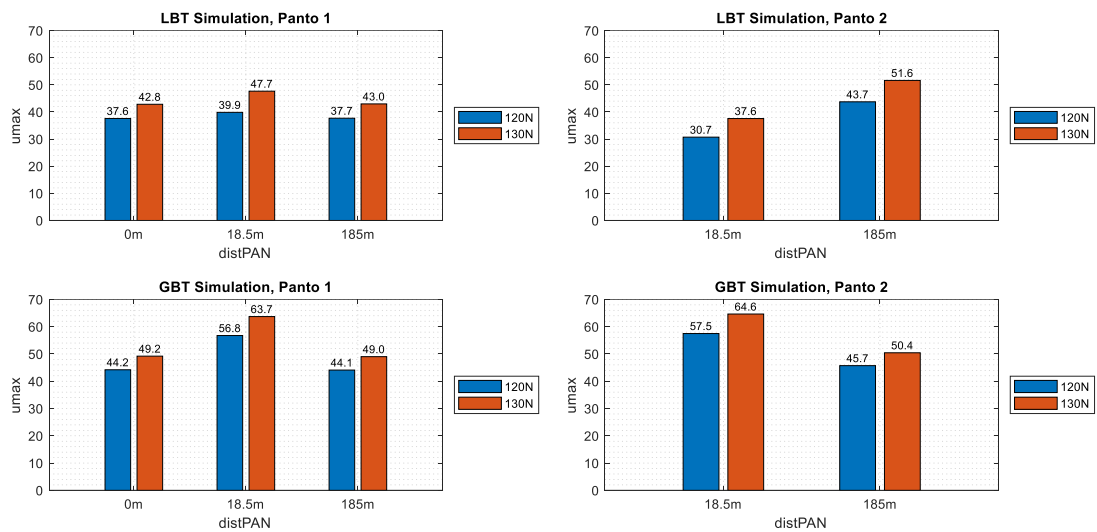


Abbildung 24: Vergleich des maximalen Fahrdrachthubs u_{\max}

Bei Erhöhung der mittleren Kontaktkraft nehmen in allen Varianten die maximalen Fahrdrachthübe zu. Die höchste Zunahme (+7,9 N) trat am nachlaufenden Stromabnehmer und langem Stromabnehmerabstand im LBT auf. Die absoluten Zunahmen (roter Balken im Vergleich zu blauem Balken) sind meist im LBT höher als im GBT (Ausnahme nachlaufender Stromabnehmer in kurzem Abstand).

Für den führenden Stromabnehmer sind die maximalen Fahrdrachthübe sowohl in Einzeltraktion als auch bei Mehrfachstromabnehmerbetrieb im GBT höher als im LBT. Die höchsten Fahrdrachthübe am ersten Stromabnehmer treten in beiden Tunneln bei kurzem Stromabnehmerabstand (18,5 m) auf.

Am nachlaufenden Stromabnehmer treten im LBT bei größerem Abstand höhere Fahrdrachthübe auf als bei einem kürzeren Abstand. Im GBT zeigt sich dagegen das entgegengesetzte Verhalten.

Die höchsten Fahrdrachthübe treten im GBT auf. Der höchste Wert aller Einzelsimulationen zeigt sich für den nachlaufenden Stromabnehmer in kurzer Stromabnehmerdistanz (18,5 m) und einer mittleren Kontaktkraft von 130 N.

Der Grenzwert von 100 mm wird in allen Varianten nicht überschritten.

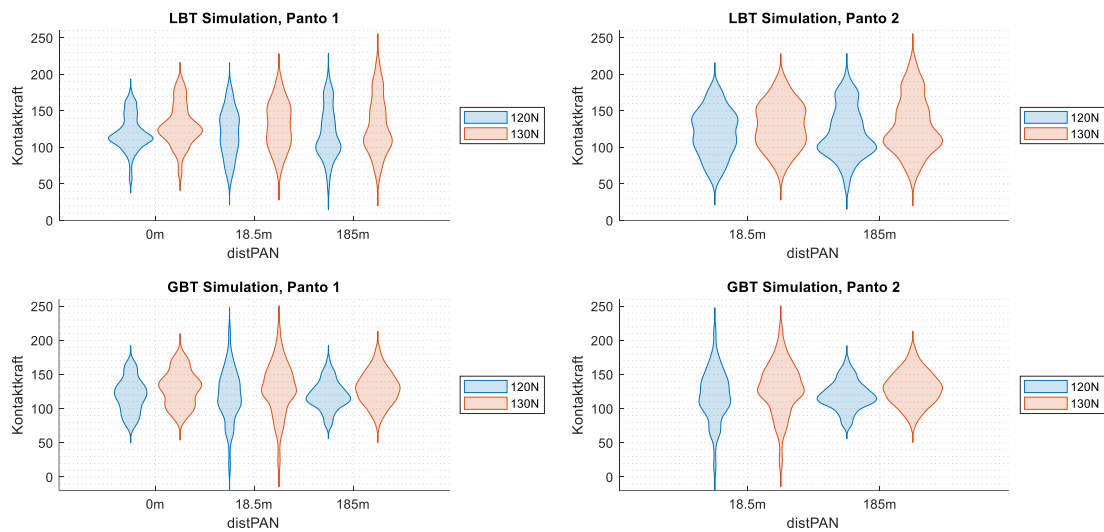


Abbildung 25: Vergleich der Kontaktkräfte als Violinendiagramm

Einen prägnanteren Blick auf die Simulationsergebnisse geben Abbildung 25 (Kontaktkräfte) und Abbildung 26 (Fahrdrahtanhub). Sie zeigen anhand sogenannter Violinendiagramme die Verteilung von Kraft und Anhub je untersuchter Variante und bieten damit die Möglichkeit eines schnellen visuellen Vergleichs. Dadurch wird deutlicher, wie die unterschiedlichen Bauarten der Oberleitung sowie die Konfigurationen und Positionen der Stromabnehmer die Kontaktkraft beeinflussen. Die Kontour entspricht einer Wahrscheinlichkeitsdichte und ergänzt die statistischen Kennwerte gemäß EN 50317. Je breiter die Violine, desto höher ist die Konzentration, also wahrscheinlicher sind die dargestellten Werte.

Beide Abbildungen zeigen durch die Form die Violine, dass die Verteilung von Kontaktkraft und Anhub sich in beiden Tunneln unterscheiden. Dies ist durch den reinen Vergleich der statistischen Kennwerte nach EN 50317 nicht ersichtlich, wo Mittelwert und Extrema gleich sind. Lange und dünne Formen stehen für eine eher Gleichverteilung der dargestellten Werte. Hingegen bilden sich Violinenformen mit breitem Bauch und spitz zulaufenden Spitzen bei einer eher um den wahrscheinlichsten Wert schwankenden Größe mit vereinzelt Extremwerten (meist Mittelwert). Vor allem Kontaktkraftverläufe, die in höheren Bereichen eine breitere Form zeigen (häufigeres Vorkommen), sind verbunden mit einer höheren dauerhaften Belastung der Oberleitung.

Interessant ist die breite Form der Violine im LBT in kurzer Distanz (18,5 m). Hier ist die Verteilung der Kontaktkräfte über einen größeren Bereich gleichmäßiger als in den anderen Varianten. Also die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Wertes in der Nähe des Mittelwertes auch deutlich höher. Eine ähnliche Form wurde sonst nur im GBT bei Einfachtraktion und kurzer Distanz für den Fahrdrahtanhub ermittelt. Auffällig ist, dass im LBT die Extrema für die lange Distanz größer sind, im GBT eher für kurze Distanzen (vgl. Abbildung 21 und Abbildung 22).

Ein Vorteil von Violinendiagramm ist die Möglichkeit der Darstellung von Multimodalitäten (vgl. Abbildung 26, LBT, Einfachtraktion). Die mehreren Ausbeulungen sind auf einzelne dynamische Ruhelagen zurückzuführen.

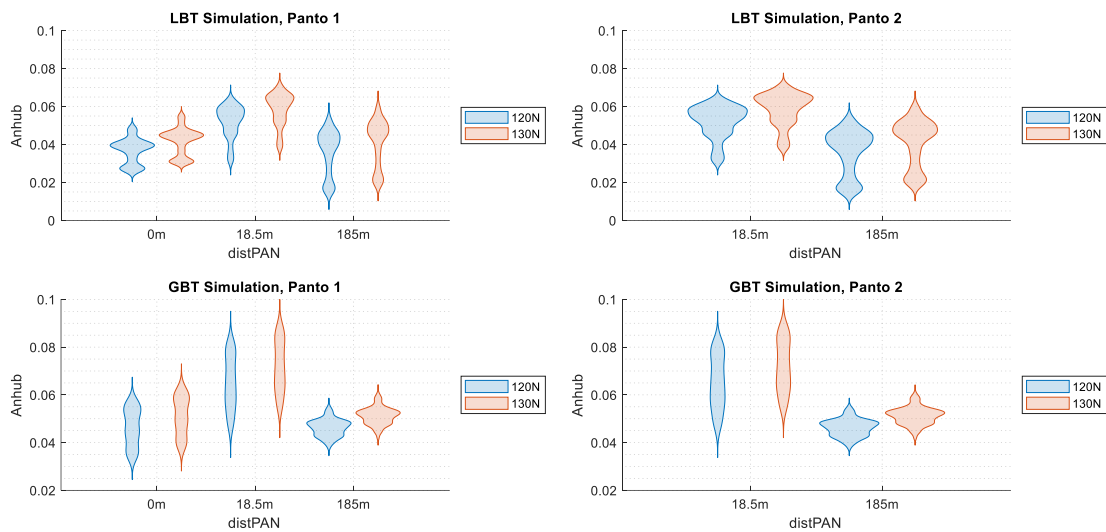


Abbildung 26: Vergleich der Fahrdrachthöhe als Violinendiagramm

Es wurden eine Vielzahl an Simulationen durchgeführt und diese umfassend ausgewertet. Untersucht wurde eine Erhöhung der mittleren Kontaktkraft von 120 N auf 130 N. Diese verstärkt die dynamische Beanspruchung von Oberleitungsanlage und Stromabnehmer. Deutlich sichtbar ist dies in den Simulationenwerten der Kontaktkraft sowie des Fahrdrachthubs.

Vergleicht man die Simulationenwerte mit den bestehenden Grenzwerten für Kontaktkraft, Standardabweichung der Kontaktkraft und Fahrdrachthub des GBT als höchstzulässige Bewertungsgröße, so werden diese in allen untersuchten Varianten nicht überschritten.

Die Erhöhung der mittleren Kontaktkraft erhöht die Kontaktkraftextrema F_{\max} und F_{\min} , die Standardabweichung der Kontaktkraft σ sowie den maximalen Fahrdrachthub am Stützpunkt. Im LBT sind die Kontaktkräfte etwas höher als beim GBT, hingegen ist im GBT der Fahrdrachthub etwas höher als im LBT.

Die höchsten Belastungen und damit kritischsten Fälle traten in Mehrfachtraktion auf. Ob am führenden oder nachlaufenden Stromabnehmer ist abhängig von der Distanz der Stromabnehmer und dem der Tunneloberleitung.

Alle Simulationen wurden mit einer einheitlichen Fahrgeschwindigkeit von 200 km/h durchgeführt. Es ist bereits aus verschiedenen Publikationen zur Mehrfachtraktion bekannt, dass auch bei geringeren Befahrgeschwindigkeiten erhöhte Kontaktkräfte sowie stärkere Fahrdrachthübe auftreten können. Verstärkt wird dieser Effekt mit steigender Stromabnehmeranzahl. In späteren Untersuchungen zur Harmonisierung der Zulassungsbedingungen in LBT und GBT sollte dieser Aspekt näher betrachtet werden.

5 Literaturrecherche zum Verschleiß von Fahrdrähten

5.1 Einflussgrößen und Erfahrungen aus Arbeiten an TU Dresden

Frank Pintscher [13] thematisiert in seiner Dissertation die Kontaktvorgänge und den Verschleiß des Systems aus Fahrdraht und Stromabnehmer. In der Dissertation werden mechanischer und elektrischer Verschleiß unterschieden und deren Abhängigkeiten von Einflussgrößen gezeigt. Dabei wird herausgearbeitet, dass aufgrund der Vielzahl an Einflussfaktoren und deren gegenseitiger Wechselwirkungen der Verschleiß ein komplexes Themenfeld ist. Frank Pintscher [13] gibt in Abbildung 27 eine zusammengefasste Übersicht über Zusammenhänge. Es wird deutlich, dass die Kontaktkraft abhängig von der Geschwindigkeit ist und sowohl elektrischen als auch mechanischen Verschleiß beeinflusst. Der elektrische Verschleiß wird durch das Schmelzen, Verdampfen oder Verbrennen von Strombrücken hervorgerufen und die Temperatur im Kontaktbereich ist dafür ein bedeutender Parameter [13, p. 18]. Dem mechanischen Verschleiß liegen elastische Deformation, plastische Deformation, Adhäsion und Abrasion zu Grunde [13, p. 22]. Weitere Details zu Einflüssen auf den mechanischen und elektrischen Verschleiß sind in der Dissertation von Pintscher [13] enthalten.

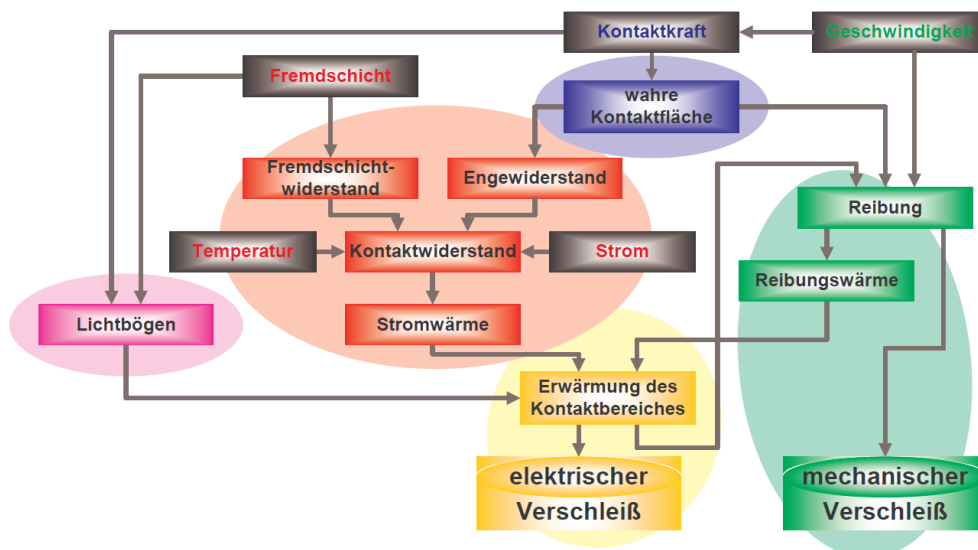


Abbildung 27: Einflüsse auf den Fahrdrachtverschleiß, entnommen aus [13]

Die qualitativen Abhängigkeiten des mechanischen Verschleißes und des elektrischen Verschleißes von der Kontaktkraft sind in Abbildung 28 [13] dargestellt. Während der mechanische Verschleiß mit der steigender Kontaktkraft wegen erhöhter Reibung zunimmt, steigt der elektrische Verschleiß mit sinkender Kontaktkraft aufgrund der Häufigkeit von Lichtbögen.

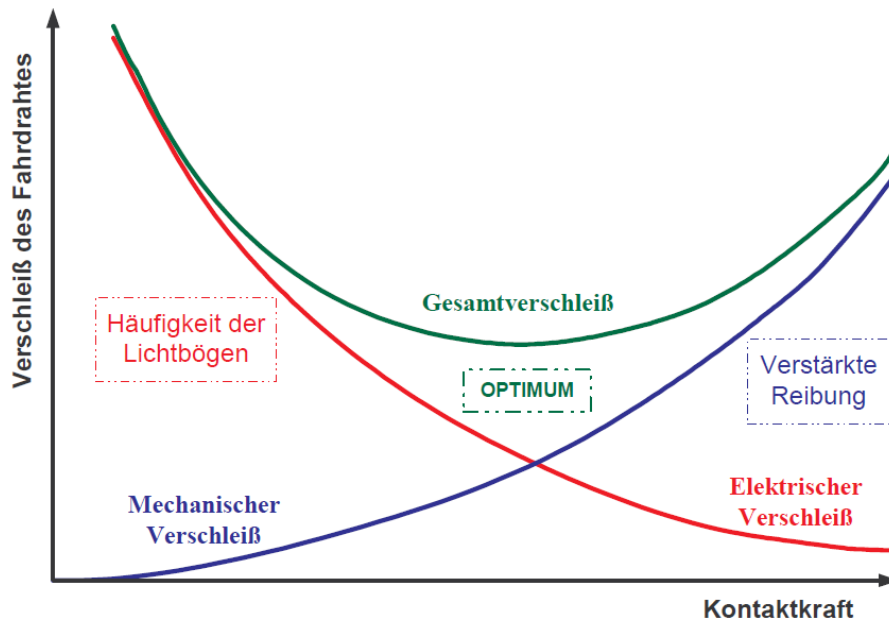


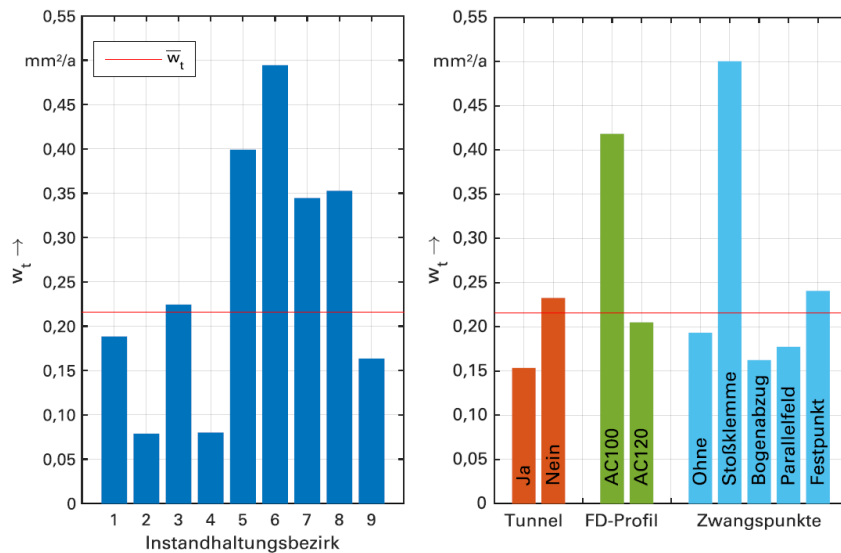
Abbildung 28: Fahrdrabtverschleiß in Abhängigkeit der Kontaktkraft, entnommen aus [13]

Der optimale Wert der Kontaktkraft zur Minimierung des Gesamtverschleißes kann wegen der Vielzahl an Einflussfaktoren und deren Abhängigkeit von den Einsatzbedingungen nicht benannt werden. Pintscher [13] gibt an, dass das Merkblatt UIC 608 E für Stromabnehmer bei Einphasen-Wechselstrombahnen eine minimale fahrdynamische Anpresskraft von 40 N empfiehlt. [13, p. 16]

Messungen des Fahrdrabtverschleißes unter Betriebsbedingungen sind von Bedeutung, jedoch ist für die Detektion des Verschleißes ein langer Betriebszeitraum beziehungsweise eine große Zahl an Stromabnehmerdurchgängen nötig. Des Weiteren sind sich verändernde Rahmenparameter wie Kontaktkraft, Kontaktstrom oder Umweltbedingungen relevant, aber nur mit großem Aufwand erfassbar. Die Messung des Verschleißes im Labor ist geeignet, um verschiedene Materialien miteinander zu vergleichen, jedoch müssen Einschränkungen beachtet werden. Bei sehr geringem zeitlichem Abstand der Schleifleistendurchgänge ist kein Einfluss der Fahrdrabtpatina vorhanden. Pintscher hält absolute Verschleißraten in diesem Zusammenhang daher für nicht möglich. [13, p. 23]

Sebastian Terfloth [14] untersucht in seiner Dissertation die Instandhaltung von Oberleitungen im Nahverkehr. Der Einfluss von Tunneln, Zwangspunkten und Fahrdrabtprofilen auf den Verschleiß der Oberleitungen wird betrachtet. Die Ergebnisse sind in nachfolgender Abbildung 29 [14] dargestellt. Den geringeren Verschleiß im Tunnel erklärt der Autor mit nicht vorhandenen Einflüssen von Regen und Eis [14, p. 33]. Abbildung 29 [14] zeigt erhöhten Verschleiß an Stoßklemmen und Zwangspunkten, was sich bei Festpunktklemmen durch eine verschlechterte Kontaktgüte erklären lässt [14, p. 33]. Der noch höher ausfallende Verschleiß an

Stoßklemmen resultiert einerseits aus dem Eigengewicht und andererseits aus Dickenunterschieden benachbarter Fahrdrähte, welche eine Reduzierung des größeren Fahrdrabtquerschnitts passend zum kleineren nötig machen. Sowohl Lichtbögen als auch mechanische Einwirkungen verursachen den Verschleiß an Streckentrennern [14, p. 37]. Stellen des Fahrdrabtes mit höchstem Verschleiß sind kritisch für die Lebensdauer des Fahrdrabtes [14, p. 34]. Entsprechend sind nicht nur niedrigere Verschleißraten vorteilhaft, sondern auch ein möglichst gleichmäßiges



Links: Mittlere Verschleißrate \bar{w}_t aller Messpunkte (rot) sowie je Instandhaltungsbezirk; Rechts: Einfluss von Tunnel, Fahrdrabtprofil und Zwangspunkten

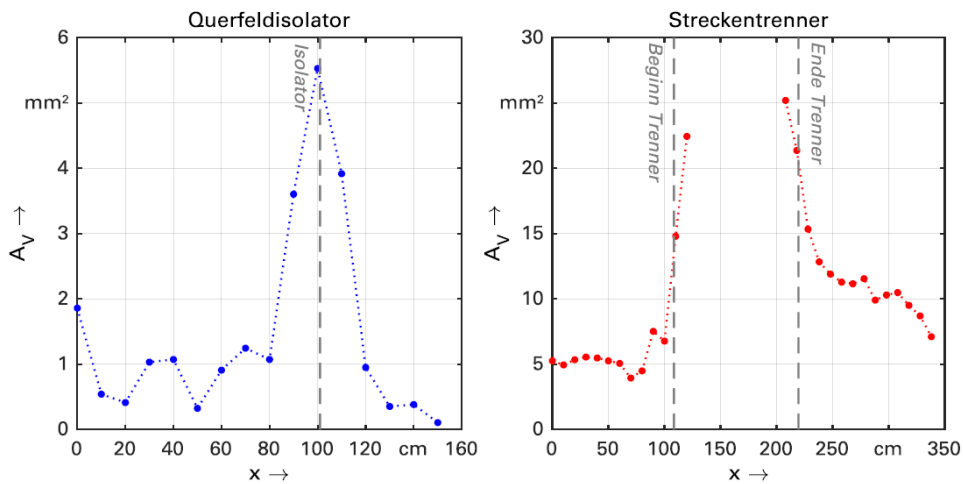
Abbildung 29: Jährliche Verschleißraten im Nahverkehr, aus [14]

Verschleißverhalten [14, p. 43].

Die Arbeit von Pintscher [13] wird von Terfloth [14] zitiert und hohe Kontaktkräfte als Ursache von mechanischem Verschleiß, zu niedrige Kontaktkräfte als Grund für elektrischen Verschleiß benannt. Insbesondere Lichtbögen führen zu hohen Schäden, da sie mit hohen Temperaturen verbunden sind. [14, p. 48]

Lokale Schwankungen der Kontaktkraft führen zu Verschleißmaxima, weshalb eine gleichmäßige Elastizität über die Fahrleitung hinweg anvisiert wird, um solche Schwankungen zu vermeiden. Zusätzlich am Fahrdrabt installierte Massen verringern die Elastizität und infolgedessen fällt der Anhub kleiner aus. Daraus resultiert eine Beschleunigungskraft auf den Stromabnehmer und eine lokal erhöhte Kontaktkraft, was in Bezug auf Verschleiß unvorteilhaft ist. Jedoch kann auch eine zu große Elastizität durch zu kleine Kontaktkräfte und Lichtbogenbildung Verschleiß hervorrufen. [14, pp. 56-57]

Der lokal durch Isolator und Streckentrenner hervorgerufene Verschleiß ist in nachfolgender Abbildung 30 [14] veranschaulicht. Diese beiden harten Stellen führen zu einem Anstieg des Verschleißes, sodass der Verschleiß in der Nähe von Streckentrenner und Isolator bis zu fünf Mal höher ist als in weiterer Entfernung.

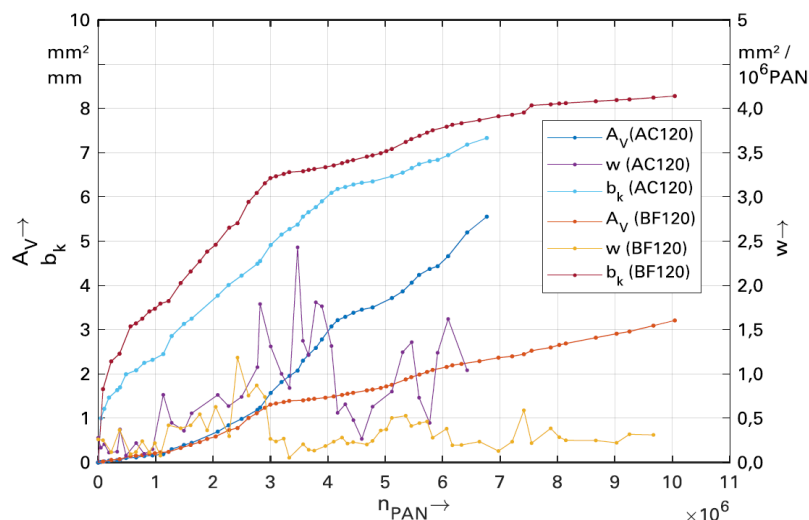


Verschlossene Querschnittsfläche mit lokalen Maxima an harten Stellen

Abbildung 30: Verschleiß an Querfeldisolator und Streckentrenner, aus [14]

Eine Einschätzung des von Stromabnehmerdurchgängen verursachten Verschleißes ermöglicht folgende Abbildung 31 [14], in der die verschlissene Querschnittsfläche A_V , die Kontaktspiegelbreite b_k und die Verschleißrate w in Abhängigkeit der Stromabnehmerdurchgänge n_{PAN} jeweils für AC120- und BF120-Fahrdrähte enthalten sind. Die Verschleißrate variiert über die Anzahl der Stromabnehmerdurchgänge.

Terfloth [14, pp. 49-50] erklärt, dass sich bei Prüfstandsversuchen und Datenerfassungen in realen Anlagen zum Fahrdrabtverschleiß die Versuchsparameter beziehungsweise die technisch-betrieblichen Randbedingungen der Anlagen jeweils unterscheiden. Dadurch sind die Ergebnisse der Versuche und Datenerhebungen als separate Erkenntnisse zu sehen sowie die Vergleichbarkeit untereinander



Verschlossene Querschnittsfläche, Verschleißrate und Kontaktspiegelbreite in Abhängigkeit der Anzahl der Stromabnehmerdurchgänge

Abbildung 31: Verschleiß über Stromabnehmerdurchgänge, aus [14]

eingeschränkt. Bei Prüfstandsversuchen findet eine kontinuierliche Beschleifung statt, sodass sich keine Oxidschicht bildet. Dies und fehlende Umwelteinflüsse führen zu idealisierten Kontaktbedingungen. Damit begründet Terfloth weshalb eine um eine Größenordnung kleinere Verschleißrate für Prüfstandsversuche typisch ist. Für ein AC-Vollbahnsystem mit Fahrdraht aus CuAg0,1 und einer Kontaktkraft von etwa 125 N zitiert Terfloth ein Verschleißrate von circa $8 \text{ mm}^2 / 10^6$ Stromabnehmerdurchgängen. [14, pp. 49-50]

In der Arbeit von Bregulla et al. [15] werden unterschiedliche Werkstoffe hinsichtlich des Fahrdrahtverschleißes begutachtet. Analog zu Sebastian Terfloths Dissertation kommen die Autoren zum Ergebnis, dass an bestimmten Stellen erhöhter Verschleiß auftritt. Stoßverbinder und Stoßklemmen werden dabei aufgeführt und der Verschleiß mit zusätzlicher dynamischer Belastung erklärt.

Helwig et al. [16] entwickeln eine Methodik zur Berechnung von Lebenszykluskosten von Fahrdrähten, wobei dabei wiederum die Bedeutung besonderer Stellen für die Lebensdauer herausgearbeitet wird. Dies sind neben Fehlerstellen und harten Punkten bei Massenanhäufungen auch Beschleunigungsbereiche der Fahrzeuge mit hoher Strombelastung [16, p. 191].

Bregulla, Wottke und Resch [17] führten im Jahr 2024 auf der Strecke Köln-Neuss Untersuchungen der Fahrdrahtdicke in der Umgebung von Stegklemmen und Seitenhaltern per Handmessung mit Mikrometerschrauben durch. Zudem standen den Autoren frühere Messungen der Fahrdrahtdicke des in 2012 eingebauten Fahrdrahtes zur Verfügung. Aus den Fahrdrahtdickemessungen werden abgenutzte Fahrdrahtquerschnitte ermittelt. Für die Jahre 2022 und 2023 werden jeweils knapp 27000 Zugfahrten auf der Strecke angegeben. In Abbildung 32 [17] sind die Ergebnisse der Messungen unterteilt nach Fahrdrahtmaterial dargestellt.

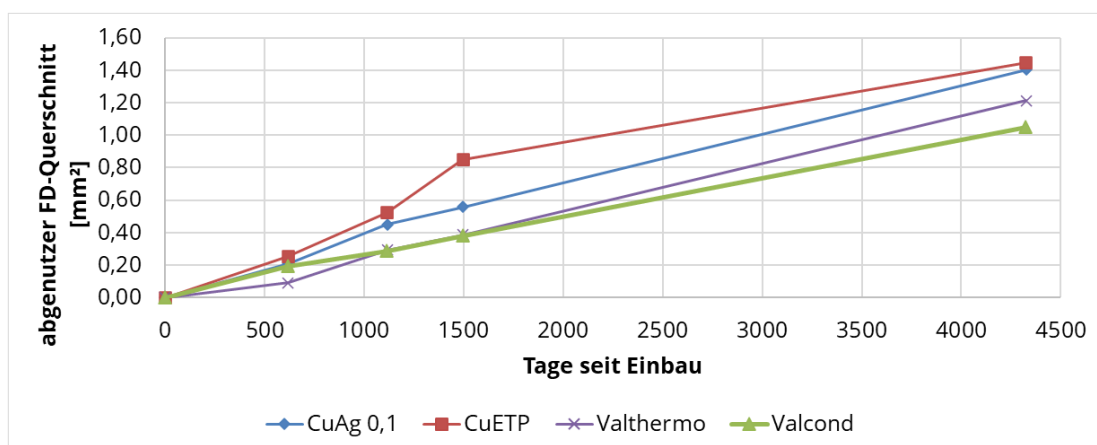


Abbildung 32: Abgenutzter Fahrdrahtquerschnitt auf der Strecke Köln-Neuss, entnommen aus [17]

Aufgrund von Kettenwerksabsenkungen ist die Vergleichbarkeit des Materials CuETP eingeschränkt. Im Allgemeinen benennen die Autoren 2.000.000

Stromabnehmerdurchgänge bis zum Lebensdauerende von AC 120 CuAg 0,1-Fahrdrähten. Der Verschleiß des Fahrdrahtes wird von Fahrgeschwindigkeit, Traktionsstrom, Andruckkraft der Stromabnehmer, Toleranz der Fahrdrahtlage und der Materialpaarung Fahrdraht-Schleifleiste beeinflusst. [17]

In Abbildung 32 zeigen die Messungen für das Material CuAg 0,1 einen näherungsweise linearen Zusammenhang von verschlissenen Fahrdrahtquerschnitt und Tagen seit Einbau. Nach circa 4.300 Tagen sind rund 1,4 mm² Querschnittsfläche verschlissen. Ein detailliertes Betriebsprogramm mit Zugdurchfahrten und Stromabnehmerdurchgängen im gesamten betrachteten Zeitraum liegt nicht vor. Unter der Annahme, dass die jährlichen knapp 27.000 Zugfahrten aus 2022 und 2023 für den gesamten Zeitraum seit Einbau gültig sind, ergeben sich etwa 74 Züge pro Tag im Zeitraum. Wird zudem angenommen, dass jeder Zug einen Stromabnehmer hat, ergeben sich:

$$4.300 \text{ Tage} * 74 \frac{\text{Züge}}{\text{Tag}} * 1 \frac{\text{Stromabnehmer}}{\text{Zug}} \approx 318.082 \text{ Stromabnehmerdurchgänge}$$

Aus der verschlissenen Querschnittsfläche von rund 1,4 mm² und den circa 318082 Stromabnehmerdurchgängen lässt sich eine Verschleißrate von

$$\frac{1,4 \text{ mm}^2}{318082 \text{ Stromabnehmerdurchgänge}} \approx 4,4 \frac{\text{mm}^2}{10^6 \text{ Stromabnehmerdurchgänge}}$$

für den CuAg 0,1-Fahrdraht ermitteln.

Im Rahmen des ENUBA-Projektes [18] wurde der Betrieb von Lastkraftwagen mit Stromabnehmern unter Oberleitungen erprobt. Dabei ist der Verschleiß von Fahrdrähten aus hartgezogenem Kupfer und Magnesium-legiertem Kupfer von Interesse. Für die Verschleißraten, die auf Prüfstandsversuchen ermittelt werden, ist zu beachten, dass auf dem Prüfstand keine harten Stellen, keine Lichtbogenbildung und keine Umwelteinflüsse abgebildet werden können. Die absoluten Verschleißraten von Prüfstandsversuchen und realem Betrieb sowie von Prüfstandsversuchen untereinander können sich daher um ein bis zwei Größenordnungen unterscheiden. Für den Vergleich von verschiedenen Fahrdrahtmaterialien unter gleichen Bedingungen sind Prüfstandsversuche geeignet. [18]

5.2 Allgemeine Literatur im Kontext von Fahrdrähten

Puschmann et al. [1] geben in der vierten Auflage des Buches Fahrleitungen elektrischer Bahnen einen umfangreichen Überblick über Planung, Berechnung, Ausführung und Betrieb von Fahrleitungen. Die Autoren halten statistisch gesicherte, präzise Prognosen der Lebensdauer von Fahrdrähten für kaum möglich, was sie mit unterschiedlichen Einsatzbedingungen der Fahrdrähte begründen. [1, p. 1478]

Puschmann et al. [1, p. 1471] zitieren Frank Pintschers [13] grafische Darstellung der Abhängigkeit des Fahrdrahtverschleißes von der Kontaktkraft. Mechanischer Verschleiß nimmt mit höherer Kontaktkraft aufgrund verstärkter Reibung zu. Hingegen nimmt elektrischer Verschleiß mit niedrigerer Kontaktkraft wegen vermehrter Lichtbogenbildung zu. Lichtbögen können durch Knick im Fahrdraht,

Masseanhäufungen, Mikrowellen im Fahrdrabt oder Fremdschichten auf dem Fahrdrabt hervorgerufen werden. Eine Ursache für Fremdschichten können Witterungseinflüsse sein, etwa die Bildung von Eis. [1, p. 1471]

Für Stellen, an denen vermehrte Lichtbogenbildung und starke Bestrahlung zu erwarten ist, sollten die Ermüdungslebensdauern abgeschätzt und bei der Instandhaltung sowie der Ermittlung der Lebensdauer berücksichtigt werden. Eine Kombination mehrerer Einflussfaktoren wird als Vermutung für Ermüdungsbrüche genannt. Lichtbogenbildung, erhöhte Kontakttemperaturen, höhere Schwingungsamplituden, starke Elastizitätsgradienten an Klemmen, chemische Reaktionen oder eine Vielzahl an Stromabnehmerdurchgängen fördern höhere mechanische Beanspruchungen. [1, p. 1471]

Die Streuung der Kontaktkraft beeinflusst, wie gleichmäßig der Verschleiß auftritt und geringere Streuungen führen zu gleichmäßigerem Verschleiß, sofern keine Lichtbögen entstehen. Bedeutend für den Verschleiß sind zudem Elastizitätsunterschiede entlang des befahrenen Fahrdrabts, da diese zu Streuung des Verschleißes führen. Infolge von Punktmassen kann mit leicht vergrößertem Verschleiß gerechnet werden, solange keine großen Schwankungen von Kontaktpunkthöhe und Kontaktkraft vorliegen. In Tunneln fällt der Verschleiß kleiner aus, da die Umgebungsbedingungen und die Elastizitäten homogener sind. Durch hohe Lastaufnahme, wie in Steigungsstrecken, steigt der Fahrdrabtverschleiß. Notwendige Instandsetzungsarbeiten können Fahrdrabtverschleiß an Störstellen begünstigen. [1, p. 1478]

Höhere Fahrgeschwindigkeiten führen zu höheren Kontaktkräften [1, p. 1472]. Eine Patina bildet sich nach kurzer Zeit auf Fahrdrabten aus reinem oder niedriglegiertem Kupfer. Diese durch Oxidation verunreinigte Schicht hat Einfluss auf den Kontakt von Fahrdrabt und Stromabnehmer. Die Patina hat einen geringeren Reibwert und eine höhere Härte als reines Kupfer, was für den Fahrdrabtverschleiß vorteilhaft ist. Jedoch ist der elektrische Widerstand durch die Patina erhöht. Durch Regen wird der Verschleiß im Vergleich zu trockenen Tunnelbereichen vergrößert. [1, p. 1472]

Ein geringer und gleichmäßiger Verschleiß ist anzustreben, was in Planung, Einbau und Instandhaltung des Fahrdrabtes zu berücksichtigen ist. Häufig sind an Stellen mit lokal erhöhtem Verschleiß größere Kontaktkräfte beziehungsweise Lichtbogenentstehung durch zu geringe Kontaktkräfte vorhanden. Zusätzliche Massen wie Streckentrenner oder kreuzende Fahrdrabte mit Kreuzungsstäben kommen dafür als Ursache in Frage. An Fahrdrabtstützpunkten können Kontaktkraftänderungen durch veränderte Elastizität ebenfalls erhöhten Verschleiß verursachen. Überlagerungen von Schwingungen im Kettenwerk können zu ähnlichen Effekten führen. Eine Abnahme der Fahrdrabtquerschnitte ist zudem an Welligkeiten oder Knicken im Fahrdrabt zu beobachten. [1, p. 1473]

Die Stromdichte sowie die Einwirkdauer beeinflussen den elektrischen Verschleiß. Diese sind neben der Fahrgeschwindigkeit und des Leistungsbedarfes auch von der Fahrdrabtseitenlage abhängig. Die Verweildauer der Kontakte ist bedeutend und zulässige Grenztemperaturen werden im Stillstand oder geringer Fahrgeschwindigkeit mit höherer Wahrscheinlichkeit überschritten. Höhere Fahrgeschwindigkeiten sind mit größerem Leistungsbedarf und erhöhten Stromdichten verbunden. Der elektrische Verschleiß erhöht sich durch erhöhte Strom- und Temperatureinwirkung. Fahrdrabtrisse können bei Überschreitung der zulässigen Grenztemperatur oder der

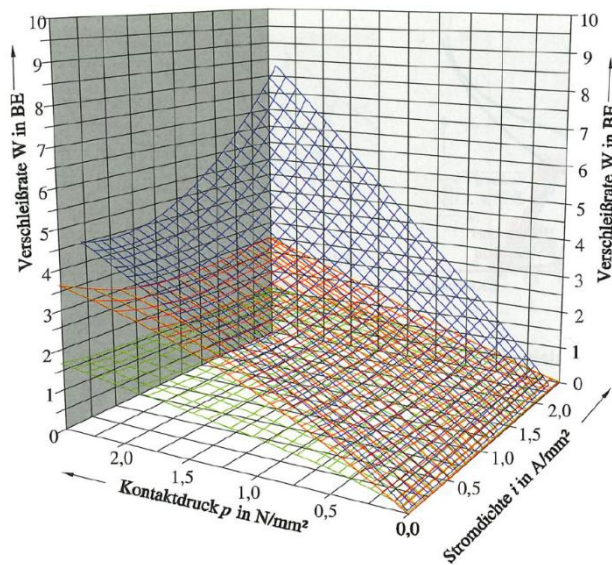
Abschmelzstromstärke auftreten. Eine ungünstige Kombination von Oberleitung und Stromabnehmer kann starke Lichtbogenbildung verursachen, sodass die Fahrdraktkontaktfläche aufgeraut und teils entfestigt wird oder Perlenbildung stattfindet. Perlenbildung ist ein Zeichen für starke Lichtbogenbildung infolge von hohen Stromstärken beziehungsweise intensiver Dauer. Ein Abbrand des Fahrdrahtes kann bei ungünstigen Bedingungen hinsichtlich Fahrdraktverschleiß, Stromverteilung über Schleifstücke, Übergangswiderstand zwischen Fahrdrakt und Schleifstück, möglicher Lichtbögen, Dauer und Höhe des Kurzschlussstromes auftreten. Kreuzende Weichenbespannung ist mit elektrischem Verschleiß durch Lichtbogenentstehung behaftet. Die Lebensdauer des Fahrdrahtes hängt vom größten lokal auftretenden Verschleiß ab. [1, pp. 1474-1475]

Puschmann et al. [1] zitieren die in einem Projekt auf Prüfständen ermittelten Verschleißraten der Fahrdraktmaterialien Cu-ETP, CuAg_{0,1} und CuSn_{0,1}, welche bei circa 0,28 bis 0,32 mm² pro 10⁶ Stromabnehmerdurchgänge liegen. Die Autoren kommen zum Schluss, dass diese Verschleißraten um eine Größenordnung kleiner sind als Verschleißraten unter Betriebsbedingungen, was aus der kontinuierlichen Beschleifung und nicht vorhandener Oxidschichtbildung bei Prüfständen resultiert. Ein Vergleich von Materialien und deren Einflüsse sind anhand von Prüfständen möglich. [1, p. 1480]

Abbildung 33 [1] zeigt auf einem Prüfstand für verschiedenen Fahrdraktmaterialien ermittelte relative Verschleißraten bei einer Geschwindigkeit von 100 km/h. Der AC-120-CuAg_{0,1}-Fahrdrakt weist im Vergleich zum AC-120-CuMg_{0,4}-Fahrdrakt höhere Verschleißraten auf. Noch höhere Verschleißraten zeigt der AC-100-Cu-Fahrdrakt. Ein zunehmender Kontaktdruck geht mit einer höheren Verschleißrate einher, was der Abbildung entnommen werden kann.

Puschmann et al. [1, pp. 1487-1488] thematisieren die von Puschmann und Kaschky [19] bei magnesiumlegierten Fahrdrähten durchgeführten Verschleißmessungen, wobei Puschmann et al. [1, pp. 1487-1488] für die Strecke Frankfurt-Köln eine Verschleißrate von 3,8 mm² / 10⁶ Stromabnehmerdurchgänge für die Fahrdraktklemme am Z-Seil und eine Verschleißrate von 1,9 mm² / 10⁶ Stromabnehmerdurchgänge an Hängerklemmen angeben.

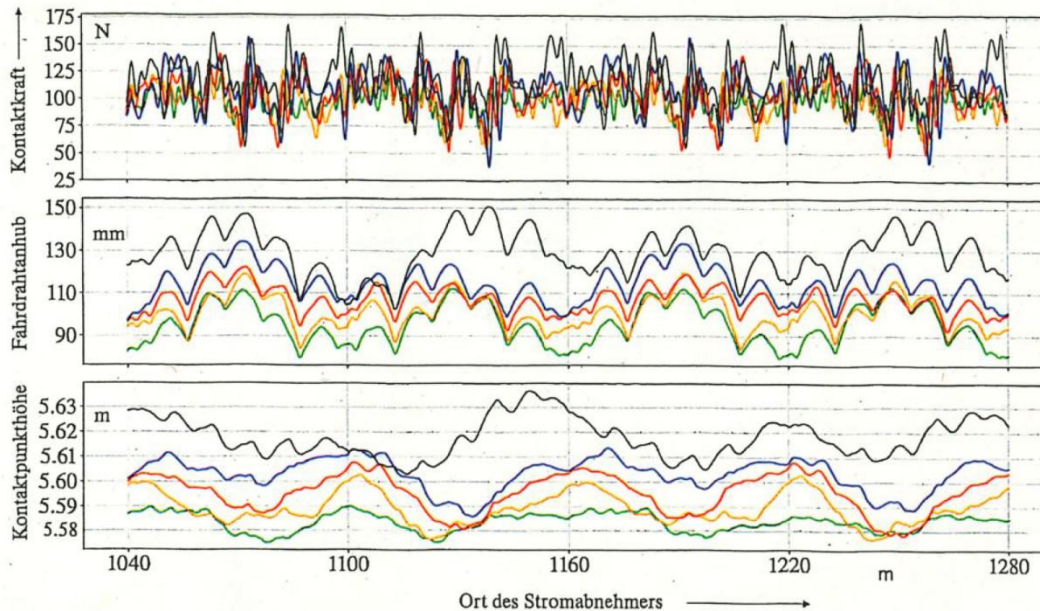
Die Ergebnisse von Simulationen von zeitlichen Kontaktkraftverläufen bei unterschiedlichen Fahrgeschwindigkeiten für eine Re 200 bei 60 m Spannweite und Einzeltraktionsfahrzeug sind in Abbildung 34 [1] enthalten. Es zeigt sich, dass mit höherer Fahrgeschwindigkeit kleinere Werte für die Minima und größere Werte für die Maxima der Kontaktkraft auftreten. Fahrdraktanhub und Kontaktkraftmittelwert wachsen mit größerer Fahrgeschwindigkeit. Zudem wachsen Standardabweichung und Verhältnis von Standardabweichung zu Mittelwert mit höherer Fahrgeschwindigkeit. Das niedrigste Kontaktkraftminimum von 38,4 N tritt bei einer Geschwindigkeit von 200 km/h auf. Das größte Kontaktkraftmaximum von rund 170 N ist bei einer Geschwindigkeit von 220 km/h vorhanden. Violinplots zeigen bei höherer Fahrgeschwindigkeit eine länger gezogene, weniger bauchige Form, womit eine veränderte Kontaktkraftverteilung sichtbar wird. Kontaktkraftmaxima sind in Bereichen um Stützpunkten und ersten Hängern zu beobachten. Eine Oberleitung Re 200 ist in



Auf einem Versuchsstand ermittelte Fahrdrabtverschleiß für Fahrdrähte AC-100 – Cu (blau), AC-120 – CuAg0,1 (rot) und AC-120 – CuMg0,4 (grün) mit Hartkohleschleifstücken von ICE-Stromabnehmern bei 100 km/h Befahrgeschwindigkeit [18.48].

Abbildung 33: Auf einem Prüfstand ermittelte relative Verschleißraten, entnommen aus [1]

Einzeltraktion auch mit 220 km/h befahrbar, was allerdings mit höherem Fahrdrabtanhub, größerer Belastung von Hängern und Stromverbindern, einer schlechteren Kontaktgüte und insbesondere bei Doppeltraktion verschlechterten Qualität der Stromabnahme verbunden ist. [1, pp. 753-754]



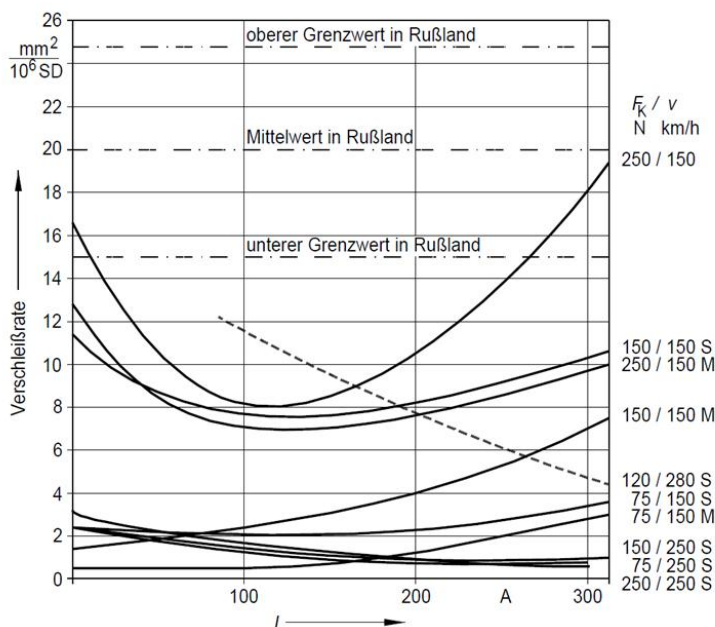
Kontaktkraft, Fahrdrabtanhub und Kontaktbahn infolge der Variation der Befahrgeschwindigkeit eines Fahrzeugs in Einzeltraktion im Referenzmodell gemäß Bild 11.74. Befahrgeschwindigkeit: — 140 km/h, — 160 km/h, — 180 km/h, — 200 km/h, — 220 km/h

Abbildung 34: Simulationsergebnisse für Re 200, entnommen aus [1]

Kießling et al. [20] geben in der zweiten Auflage des Buches Fahrleitungen elektrischer Bahnen einen umfassenden Überblick zu Planung, Berechnung und Ausführung elektrischer Fahrleitungen.

Durch Massenpunkte im Kettenwerk entstehen besondere Beanspruchungen der Fahrdrähte, da diese Massepunkte sowohl erhöhte als auch zu geringe beziehungsweise fehlende Kontaktkräfte verursachen können. Bei erhöhter Kontaktkraft wird der Abrieb vergrößert, während bei zu geringen oder fehlenden Kontaktkräften Lichtbögen entstehen. Ähnliches ist im Falle von der Überlagerung von Schwingungen im Kettenwerk zu beobachten. Eine weitere Ursache für reduzierte Fahrdrahtquerschnitte sind Welligkeiten beziehungsweise Knicke im Fahrdraht. Die Lebensdauer des Fahrdrahtes hängt vom größten lokalen Verschleiß ab. [20, p. 661]

Eine statistisch gesicherte Aussage über die absolute Lebensdauer des Fahrdrahtes ist kaum möglich, was mit unterschiedlichen Einsatzbedingungen begründet wird. Anhand von Prüfstandsversuchen (Abbildung 35) wurde ermittelt, dass Fahrdrähte aus E-Kupfer höheren Verschleiß aufweisen als silberlegierte Fahrdrähte, während silberlegierte Fahrdrähte größeren Verschleiß als magnesiumlegierte Fahrdrähte. Zudem konnte für den Einfluss der Stromstärke auf die Verschleißraten ermittelt werden, dass Minima der Verschleißrate vorliegen, wobei die Minima mit höheren Geschwindigkeiten bei größeren Stromwerten auftreten (Stromschmiereffekt). Weiterhin erhöht eine größere Kontaktkraft die Abtragsrate. Unter den Versuchsbedingungen wurde kleinerer Gesamtverschleiß bei höherer Fahrgeschwindigkeit gefunden. Für einen silberlegierten Fahrdraht im Hochgeschwindigkeitsverkehr wird eine Verschleißrate von $8 \text{ mm}^2 / 10^6$ Stromabnehmerdurchgänge genannt. [20, pp. 662-663]



Vergleich von Fahrdrahtverschleißwerten für Fahrdrähte aus Elektrolitkupfer, aus $\text{CuAg}_{0,1}$ (Index S) und aus $\text{CuMg}_{0,5}$ (Index M), bei verschiedenen Kontaktkräften F_K und Fahrdrahtgeschwindigkeiten v abhängig vom Strom.

— Meßwerte auf Prüfstand
 - - Meßwerte der DB im Betriebseinsatz
 --- Meßwerte der Russischen Staatsbahnen
 SD = Stromabnehmerdurchgänge

Abbildung 35: Verschleißraten bei verschiedenen Kontaktkräften, Geschwindigkeiten und Fahrdrahtmaterialien, entnommen aus [20]

5.3 Untersuchungen unter Betriebsbedingungen

Puschmann und Kaschky [19] thematisieren den Fahrdrabtverschleiß auf Hochgeschwindigkeitsstrecken. Ähnlich zu den vorher aufgeführten Arbeiten kommen die Autoren zum Ergebnis, dass Stellen mit verminderter oder sprunghafter Elastizität zu höherem Verschleiß führen. Daraus wird zur Reduzierung von Verschleiß die Empfehlung abgeleitet, Planung, Bau und Instandhaltung der Oberleitung derart durchzuführen, dass eine gleichmäßige Elastizität gewährleistet ist. Zudem haben Stromdichte, Flächenpressung zwischen Schleifstück und Fahrdrabt, Geschwindigkeit und Fahrdrabttemperatur Einfluss auf den Verschleiß des Fahrdrabts. Welligkeiten und Knicke im Fahrdrabt verursachen Lichtbogenbildung und unzulässige Kontaktkräfte, welche mechanischen und elektrischen Verschleiß hervorrufen. [19, p. 87]

Als weiteren verschleißanfälligen Ort wird kreuzende Weichenbespannungen genannt, da dort Elastizitätsschwankungen sowie Kontaktkraftmaxima über 300 N und Kontaktkraftminima nahe null auftreten [19, p. 92].

Auf den Strecken Göttingen-Hannover, Frankfurt-Köln und Nürnberg-Ingolstadt wird der Verschleiß vermessen und daraus eine Abschätzung der Lebensdauer vorgenommen. Dabei liegt der Fokus auf Stellen, die etwa durch Zusatzgewicht von Einbauten für Verschleiß anfällig sein können. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6 (Frankfurt-Köln) [19], Tabelle 7 (Göttingen-Hannover) [19] und Tabelle 8 (Nürnberg-Ingolstadt) [19] enthalten. Fahrdrabtkreuzungen weisen im Vergleich zu den anderen betrachteten Stellen den mit Abstand höchsten Verschleiß und die geringste geschätzte Lebensdauer auf. [19]

Puschmann und Kaschky [19, pp. 92-93] begründen den deutlich erhöhten Verschleiß bei Fahrdrabtkreuzungen durch mechanische und elektrische Wirkungen. Bei der Kreuzung entstehen Lichtbögen mit Temperaturen bis zu 2000 °C, welche die Fahrdrähte und den Kreuzungsstab punktuell erwärmen. Durch die von den Lichtbögen hervorgerufene punktuelle thermische Überbelastung entfestigen sich die Fahrdrähte und ein beschleunigter Verschleißprozess ist die Folge. Des Weiteren entsteht mechanischer Verschleiß, da Stromabnehmerdurchgänge ein Aufeinanderschlagen der Fahrdrähte verursachen. [19, pp. 92-93]

Tabelle 7: Ergebnisse Frankfurt – Köln, entnommen aus [22]

Verschleiß und Lebensdauer der Fahrdrähte auf der Strecke Frankfurt – Köln.							
	Strom- verbinder- klemme	Fahrdrabt- klemme am Z-Seil	Feldmitte zwischen Hängern	Y-Beiseil- hänger- klemme	Fahrdrabt- klemme am Stützpunkt	Fahrdrabt- kreuzung	Über- lappung
Messstelle	1	2	3	4	5	6	7
Fahrdrabtrehöhe in mm	12,62	12,53	12,73	12,74	12,66	8,88	12,57
Verschleißhöhe in mm	0,48	0,57	0,37	0,36	0,44	4,23	0,53
Durchmesser des neuen Fahrdrabts in mm	13,10	13,10	13,10	13,10	13,10	13,10	13,10
Verschleiß in mm ²	1,57	2,08	1,08	1,02	1,40	37,59	1,82
Verschleiß in %	1,30	1,73	0,90	0,85	1,17	31,30	1,50
Lebensdauer des Fahrdrabts in Jahren bis zum Erreichen der 20% Verschleißgrenze	>200	173	>200	>200	>200	-10	198
Anmerkung: 91 Stromabnehmerdurchgänge pro Tag							

Tabelle 8: Ergebnisse Göttingen – Hannover, entnommen aus [22]

Verschleiß und Lebensdauer der Fahrdrähte auf der Strecke Göttingen – Hannover.							
	Stromverbinderklemme	Fahrdrahtklemme am Z-Seil	Feldmitte zwischen Hängern	Y-Beiseilhängerklemme	Fahrdrahtklemme am Stützpunkt	Fahrdrahtkreuzung	Überlappung
Messstelle	1	2	3	4	5	6	7
Fahrdrahtresthöhe in mm	12,36	12,41	12,51	12,53	12,57	9,10	Keine Werte
Verschleißhöhe in mm	0,75	0,70	0,59	0,58	0,54	4,01	
Durchmesser des neuen Fahrdrahts in mm	13,11	13,11	13,11	13,11	13,11	13,11	
Verschleiß in mm ²	3,08	2,75	2,18	2,10	1,89	34,92	
Verschleiß in %	2,6	2,3	1,8	1,7	1,6	29,10	
Lebensdauer des Fahrdrahts in Jahren bis zum Erreichen der 20% Verschleißgrenze	150	174	>200	>200	>200	~15	

Anmerkung: 140 Stromabnehmerdurchgänge pro Tag

Tabelle 9: Ergebnisse Nürnberg – Ingolstadt, entnommen aus [22]

Verschleiß und Lebensdauer der Fahrdrähte auf der Strecke Nürnberg – Ingolstadt.							
	Stromverbinderklemme	Fahrdrahtklemme am Z-Seil	Feldmitte zwischen Hängern	Y-Beiseilhängerklemme	Fahrdrahtklemme am Stützpunkt	Fahrdrahtkreuzung	Überlappung
Messstelle	1	2	3	4	5	6	7
Fahrdrahtresthöhe in mm	13,03	13,08	13,12	13,10	13,13	10,00	13,05
Verschleißhöhe in mm	0,17	0,12	0,08	0,10	0,07	3,20	0,15
Durchmesser des neuen Fahrdrahts in mm	13,20	13,20	13,20	13,20	13,20	13,20	13,20
Verschleiß in mm ²	0,34	0,21	0,11	0,16	0,09	25,62	0,28
Verschleiß in %	0,284	0,17	0,09	0,14	0,07	21,3	0,23
Lebensdauer des Fahrdrahts in Jahren	>200	>200	>200	>200	>200	~10	>200

Anmerkung: 91 Stromabnehmerdurchgänge pro Tag

Borgwardt [21] betrachtet den Verschleiß des Fahrdrahtes auf Strecken innerhalb Deutschlands und hebt die Bedeutung bestimmter Stellen der Oberleitung für den Verschleiß hervor. Wirken Anpresskräfte und Beschleunigungskräfte überlagert auf den Stromabnehmer, weil der Stromabnehmer zu einer Bewegung gezwungen wird, resultiert daraus Fahrdrahtverschleiß. Eine lokale starke Erhöhung der Kontaktkraft kann durch das Gewicht von zusätzlichen Komponenten am Fahrdraht ausgelöst werden, was zudem anschließend infolge der Gegenbewegung des Stromabnehmers eine zu geringe Kontaktkraft und daraus folgend Lichtbogenverschleiß verursachen kann. [21, p. 292]

Störstellen, an denen die Kontaktkraft vom Mittelwert der Kontaktkraft um drei Standardabweichungen abweicht, sind für die Überwachung von Verschleiß von besonderer Bedeutung. Derartige Störstellen führen bereits bei geringeren Fahrgeschwindigkeiten zu Verschleiß. Diese Störungen können aus Fahrdrähtenfehlern, insbesondere im Stützpunktbereich, Fehlern in Festpunkten, bei Kreuzung, Weiche und Nachspannung resultieren. [21, p. 294]

[21] zeigt jährliche Verschleißraten des Fahrdrabtes in Abhängigkeit der Zugdichte für verschiedene Schleifleistenkonfigurationen. Es wurde bei Schleifleisten aus Kohle weniger hervorgerufener Verschleiß gefunden als bei Schleifleisten aus Aluminium. Doppelschleifleisten bei Einstromabnehmerbetrieb verschleifen den Fahrdrabht weniger als Einzelschleifleisten bei Zweistromabnehmerbetrieb.

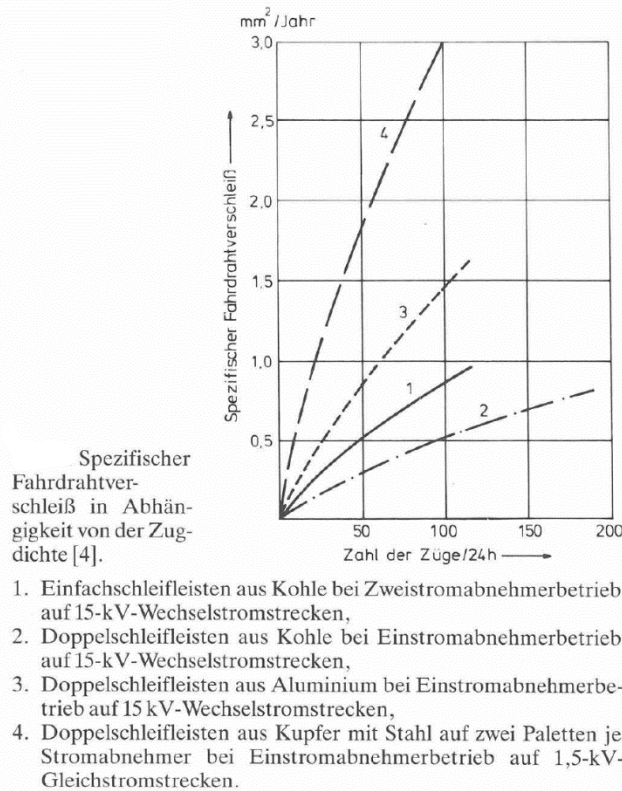


Abbildung 36: Jährlicher Fahrdrabhtverschleiß in Abhängigkeit der Zugdichte bei unterschiedlichen Schleifleisten, entnommen aus [21]

Hauben und Vandepitte [22] werten Messungen der Kontaktkraft und der Entstehung von Lichtbögen auf einer belgischen Hochgeschwindigkeitsstrecke aus. Dabei betrachten sie für jede Messung die Verteilung der Kontaktkraft und ermitteln zugehörige statistische Parameter der gemessenen Kontaktkraft. Die Konfigurationen der Thalys Züge, mit denen die Messungen durchgeführt wurden, unterscheiden sich hinsichtlich Position des Messpantographen, Positionen der gehobenen Stromabnehmer und der Komposition als Einzelzug oder zwei verbundene Zugteile. Acht Messungen als Einzelzug und acht Messungen als zwei verbundene Zugteile bei Fahrgeschwindigkeiten von jeweils etwa 260 km/h oder etwa 286 km/h werden ausgewertet. In der nachfolgenden Tabelle [22] sind für jede Nummer der Messung (N°) die ausgewerteten statistischen Parameter zur Kontaktkraft und der Anteil der entstehenden Lichtbögen in der jeweiligen Messung angegeben:

Tabelle 10: Statistische Parameter und Lichtbogenentstehung der Messungen auf einer Hochgeschwindigkeitsstrecke, entnommen aus [22]

N°	distance [km]	v _m [km/h]	F _m [N]	σ [N]	F _{min} [N]	F _{max} [N]	F _m - 3σ [N]	F _m + 3σ [N]	σ/F _m [-]	F _{median} [N]	k [-]	sk [-]	N°	NQ(1ms) [%]	NQ(5ms) [%]
1	10.6	285.7	137.2	39.4	31.7	292.4	19.0	255.5	0.29	133.5	2.75	0.37	1	0.165	0.008
2	6.3	286.6	175.6	59.7	-16.2	402.0	-3.4	354.6	0.34	173.3	2.84	0.15	2	0.724	0.156
3	6.3	285.4	148.2	39.0	43.4	325.3	31.4	265.1	0.26	145.7	2.80	0.32	3	0.208	0.000
4	6.5	285.8	178.1	59.7	-21.7	399.9	-0.9	357.1	0.34	177.6	2.82	0.10	4	0.809	0.260
5	11.5	260.4	153.2	49.7	-6.3	355.2	4.0	302.3	0.32	152.4	3.20	0.16	5	0.655	0.182
6	8.5	260.4	126.4	33.1	25.6	270.4	27.0	225.8	0.26	122.9	3.33	0.52	6	0.042	0.000
7	7.4	286.0	170.0	59.6	-40.3	403.5	-8.9	348.8	0.35	169.3	3.17	0.14	7	1.104	0.348
8	6.2	285.8	137.5	39.9	25.2	301.6	17.8	257.2	0.29	134.3	2.932	0.35	8	0.108	0.000
9	11.9	260.6	145.9	32.3	56.6	283.7	48.9	242.9	0.22	142.4	3.13	0.50	9	0.072	0.000
10	11.6	259.8	137.3	31.1	47.9	277.8	44.0	230.6	0.23	134.1	3.27	0.51	10	0.071	0.000
11	15.0	260.6	140.0	31.9	51.6	290.3	44.3	235.8	0.23	136.4	3.18	0.51	11	0.038	0.000
12	9.9	286.2	145.8	38.3	42.0	288.5	30.9	260.7	0.26	141.9	2.72	0.38	12	0.190	0.000
13	12.4	286.4	140.4	38.4	41.2	329.1	25.3	255.5	0.27	136.7	2.83	0.40	13	0.131	0.000
14	13.0	260.5	140.7	31.8	60.2	282.8	45.4	235.9	0.23	137.0	3.10	0.50	14	0.017	0.000
15	8.0	285.8	150.8	38.4	42.3	298.3	35.8	265.9	0.25	147.2	2.80	0.40	15	0.161	0.008
16	7.3	286.1	150.2	37.9	51.3	315.2	36.6	263.9	0.25	147.1	2.86	0.37	16	0.108	0.000

Neben der zurückgelegten Strecke (distance) und der Fahrgeschwindigkeit (v_m) sind aus der jeweiligen Messung ermittelte mittlere Kontaktkraft F_m, Standardabweichung der Kontaktkraftwerte σ, Minimalkraft F_{min}, Maximalkraft F_{max}, Median der Kontaktkraft, statistisches Minimum und Maximum der Kontaktkraft F_m-3σ und F_m+3σ, TSI ENE current collection quality ration σ/F_m sowie Schiefe (skewness) sk und Wölbung (kurtosis) k der Verteilung angegeben. Der prozentuale Anteil der Lichtbögen an der Messung mit minimaler Lichtbogendauer von 1 ms ist in der Spalte NQ(1ms) [%] aufgeführt. Analog enthält die Spalte NQ(5ms) [%] in den prozentualen Anteil der Lichtbögen an der Messung mit minimaler Lichtbogendauer von 5 ms. Die Messungen 1 bis 8 wurden mit zwei verbundenen Zugteilen durchgeführt, während bei den Messungen 9 bis 16 ein Zugteil zum Einsatz kam. [22]

Hauben und Vandepitte [22] geben Werte an, die nicht den Anforderungen der Normen TSI ENE:2014 beziehungsweise EN 50119:2009 entsprechen, in roter Schrift an. In orangener Schrift geben Hauben und Vandepitte [22] Werte an, die die Anforderungen erfüllen, aber nahe am Grenzwert sind.

Abbildung 37 [22] zeigt die Histogramme der Kontaktkraft der Messungen 1 bis 8. Abbildung 38 [22] zeigt die Histogramme der Kontaktkraft der Messungen 9 bis 16. Die Messungen 2, 4, 5 und 7 zeigen breitere Histogramme der Kontaktkraft als die anderen Messungen. Analog haben die Messungen 2, 4, 5 und 7 kleinere Werte für F_{min} und F_m-3σ sowie größere Werte für F_{max} und F_m+3σ im Vergleich zu den anderen Messungen.

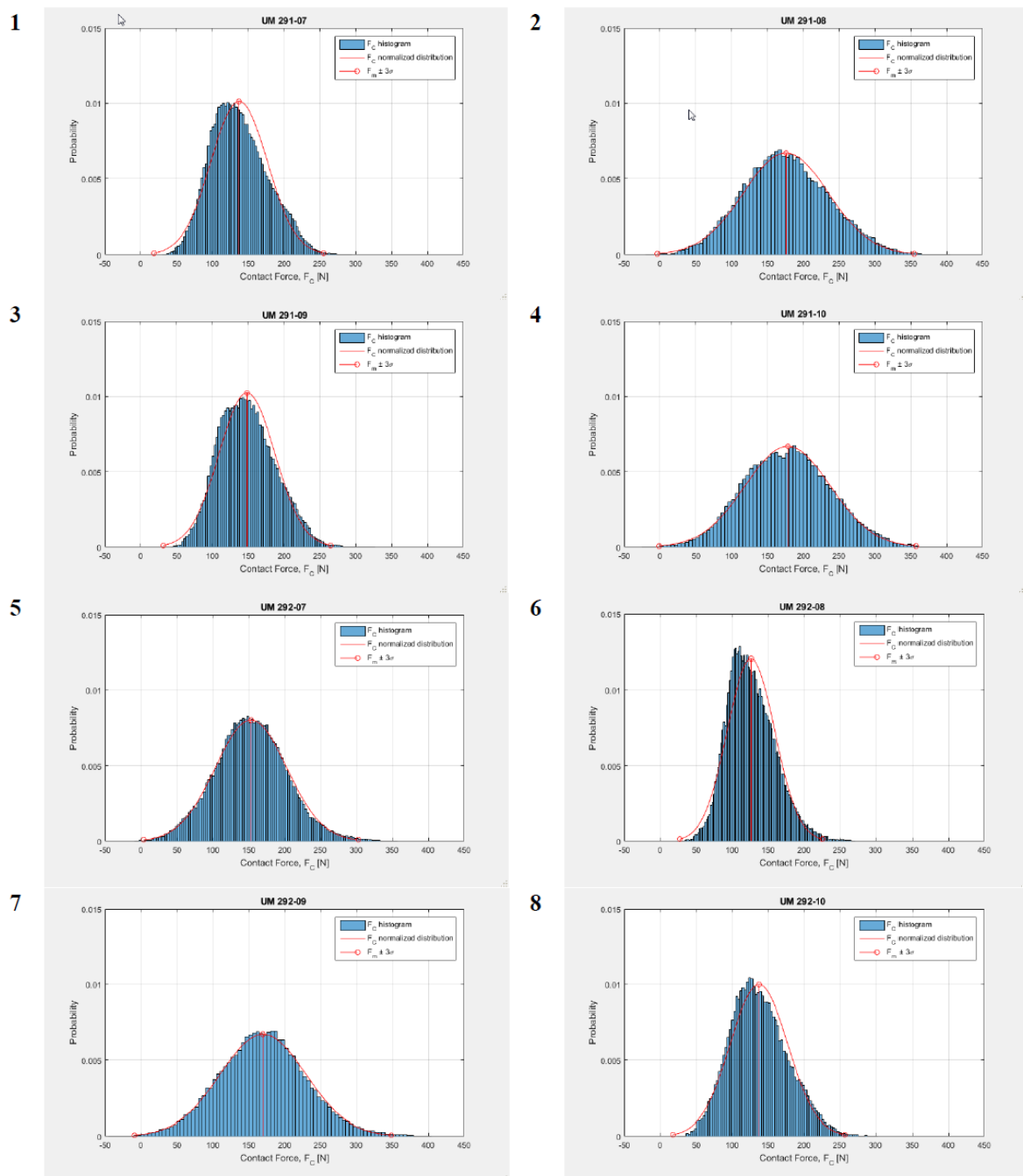


Abbildung 37: Histogramme der Kontaktkraft der Messungen 1 bis 8, aus [22]

Die Werte für σ und σ/F_m liegen bei den Messungen 2, 4, 5 und 7 höher als bei den anderen Messungen. Bei den Messungen 2, 4, 5 und 7 entstehen verglichen mit den anderen Messungen die meisten Lichtbögen mit minimaler Lichtbogendauer von 1 ms beziehungsweise 5 ms. Dabei weisen die Messungen 4 und 7 mehr Lichtbögen als Messungen 2 und 5 auf.

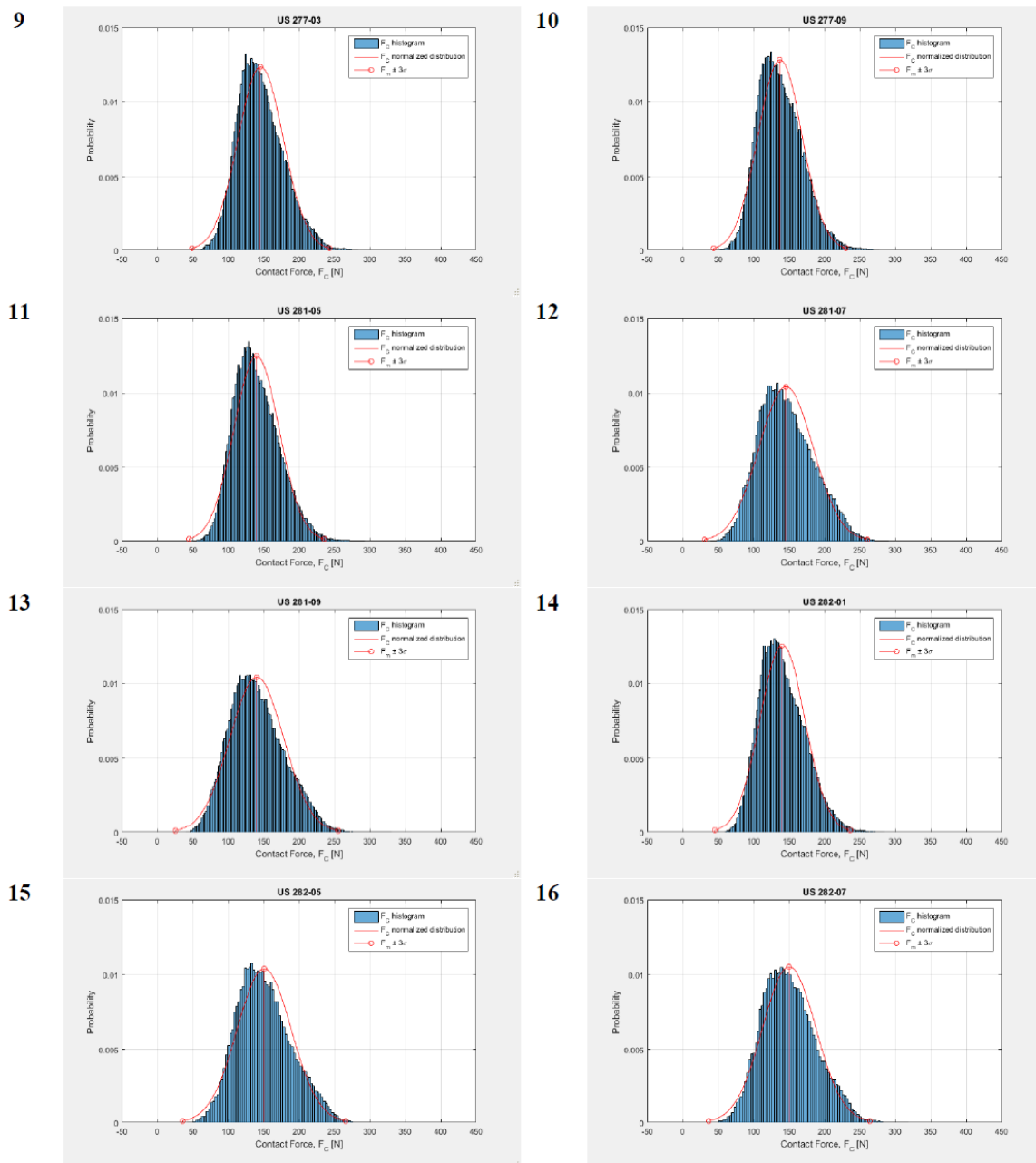


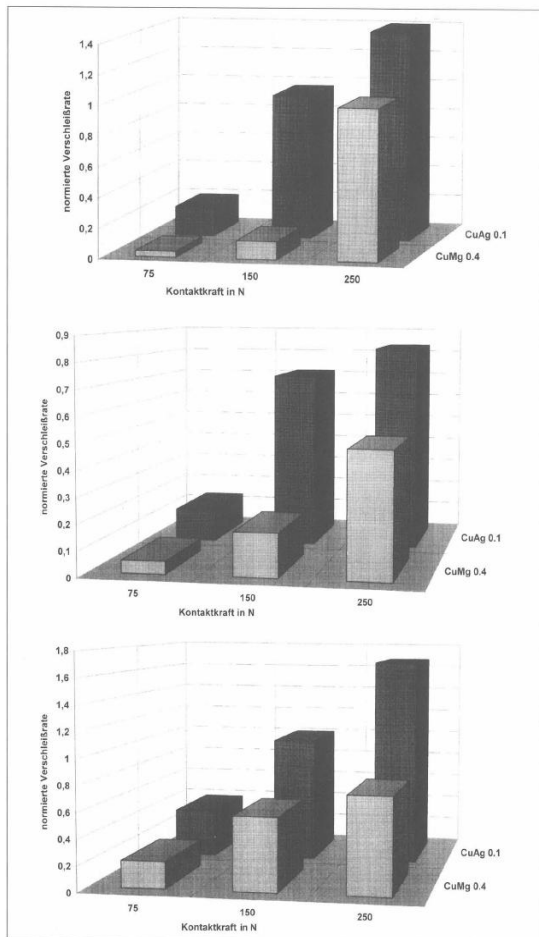
Abbildung 38: Histogramme der Kontaktkraft der Messungen 9 bis 16, aus [22]

Stephan Besier [23] untersucht den Verschleiß von Fahrdrähten im Stadtverkehr. Als Ort des größten Verschleißes werden Bereiche mit unruhigem Kontaktkraftverlauf, etwa Unstetigkeiten im Fahrdraht, unelastische Kurvenstücke, Kreuzungen und Abzweigungen, Seitenhalter und Hänger oder Massenanhäufungen wie Streckentrenner, Festpunktanker, Beidrähte und Anschlüsse von Speisekabeln beziehungsweise Querverbindern herausgestellt [23, pp. 258-259]. Mit dem erschwerten Anhub an den aufgeführten Stellen lässt sich der erhöhte Verschleiß erklären [23, p. 259]. Die mit Unstetigkeiten verbundenen Höhenlageänderungen wirken sich negativ auf das Verschleißverhalten aus, da diese Kontaktkraftspitzen oder Kontaktkraftverlust auslösen können, was zu Materialabtrag beziehungsweise

Lichtbögen führen kann [23, p. 259]. Mit Hilfe von Messfahrten kann Besier [23] Kontaktkraftspitzen zu Stützpunkten mit geringer Elastizität zuordnen, während dies bei Stützpunkten mit hoher Elastizität nicht zu beobachten ist [23, p. 259]. Besiers Austausch mit Infrastrukturbetreibern zeigt, dass lokale Maxima des Materialabriebs die Lebensdauer des Fahrdrabtes bestimmen [23, p. 262].

5.4 Untersuchungen unter Laborbedingungen

Becker et al. [24] führen Experimente zum Fahrdrabverschleiß bei Geschwindigkeiten bis zu 350 km/h, Traktionsstromstärken bis zu 300 A und Anpresskräften bis zu 250 N durch. Die Ergebnisse der Messungen sind in [24] dargestellt. Größere Kontaktkräfte führen zu höherem Abtrag und mechanischer Verschleiß ist bedeutender als elektrischer Verschleiß. Das Material CuMg 0,4 zeigt im Vergleich zu CuAg 0,1 geringeren Verschleiß bei den Versuchen.



Einfluß des Werkstoffes auf den Fahrdrabverschleiß bei der Oberleitung Bauart Re 330 bei 150 km/h Geschwindigkeit.
 oben: Stromstärke 0 A
 Mitte: Stromstärke 100 A
 unten: Stromstärke 300 A
 Unterschiedliche Ordinatenmaßstäbe beachten!

Abbildung 39: Verschleiß von Fahrdrähten aus CuMg 0,4 und CuAg 0,1, aus [24]

Auditeau et al. [25] führen Prüfstandversuche unter Verwendung verschiedener Materialien für Schleifleisten der Stromabnehmer durch und untersuchen den Verschleiß von Fahrdrähten aus Kupfer und Stromabnehmern. Neben dem Prüfstand von Hoffmann greifen sie auch auf den Prüfstand von Polimi zurück, bei dem der Einfluss von entstehenden Lichtbögen auf den Verschleiß betrachtet werden kann. Für ihre Untersuchungen haben die Autoren Erfahrungen von Infrastrukturbetreibern bezüglich des Verschleißes eingeholt und stellen Verschleißraten unter Laborbedingungen mit Verschleißraten unter realen externen Bedingungen gegenüber. Diese Gegenüberstellung unter Testung verschiedener Materialien der Schleifleisten ist in nachfolgender Abbildung 40 [25] enthalten.

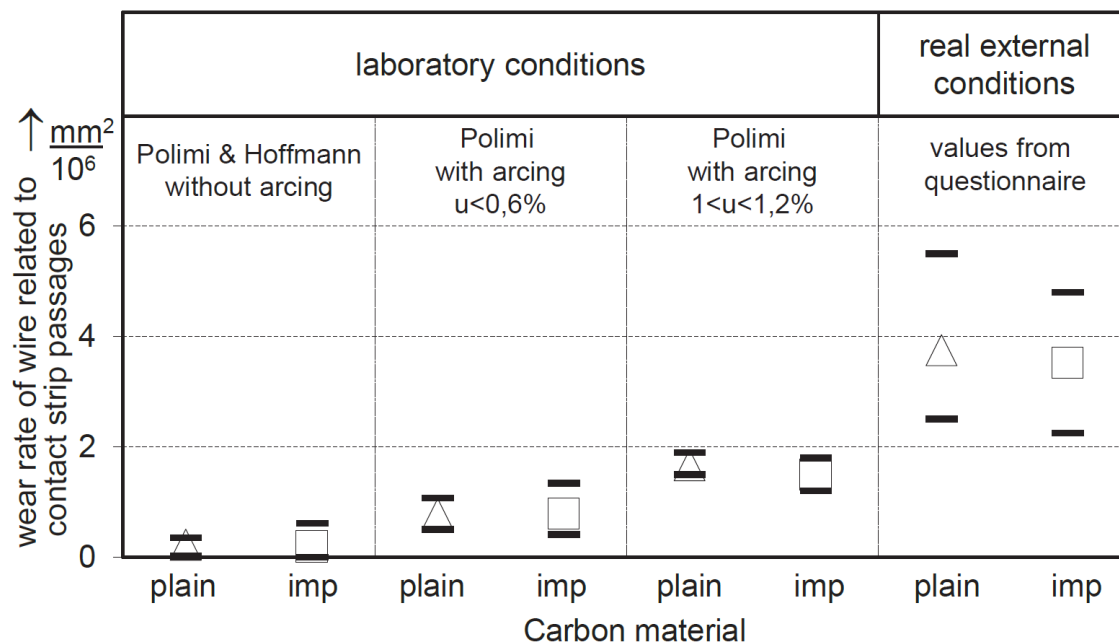


Abbildung 40: Verschleißraten im Labor und unter realen Bedingungen, aus [25]

Der Vergleich zeigt, dass Verschleißraten unter realen Bedingungen bis zu zehn Mal größer ausfallen als in den von den Autoren durchgeführten Laborexperimenten ohne Lichtbogeneinwirkung.

Unter Laborbedingungen nimmt die Verschleißrate mit größerer Lichtbogeneinwirkung stetig zu. Die Lichtbogenemissionen bringen Auditeau et al. [25] mit der Versorgungsspannung und Kontaktverlusten in Verbindung. Die Entstehung von Lichtbögen wird anhand des Überschreitens eines Grenzwertes durch die Versorgungsspannung detektiert. Der Anteil der Kontaktverluste beziehungsweise die Lichtbogendauer wird jeweils für die Geschwindigkeiten 180 km/h und 200 km/h beziehungsweise die Kontaktkräfte 60 N und 110 N untersucht. Abbildung 41 [25] zeigt die Resultate.

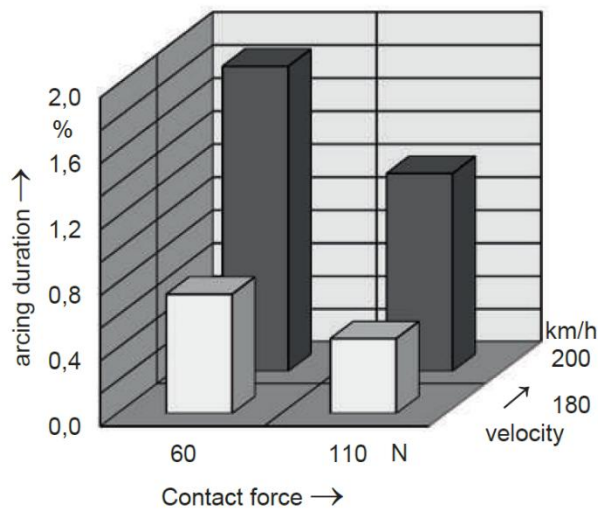


Abbildung 41: Experimente zu Lichtbogenentstehung bei unterschiedlicher Kontaktkraft und Geschwindigkeit, entnommen aus [25]

Die in Messungen ermittelte Lichtbogendauer steigt mit niedrigerer Kontaktkraft und höherer Geschwindigkeit. Im Prüfstand von Polimi wird der Fahrdrabt in 36 Klemmen eingespannt, was zu harten Stellen in der Nähe der Klemmen führt. In blauen Bereichen wird weniger Lichtbogenentstehung an Klemmenpositionen beobachtet, während in roten Bereichen mehr Lichtbogenentstehung an Klemmenpositionen vorhanden ist. Die Verschleißraten des Fahrdrabtes bei Verwendung diverser Materialien des Kontaktstreifens sind in Abbildung 42 [25] enthalten. [25]

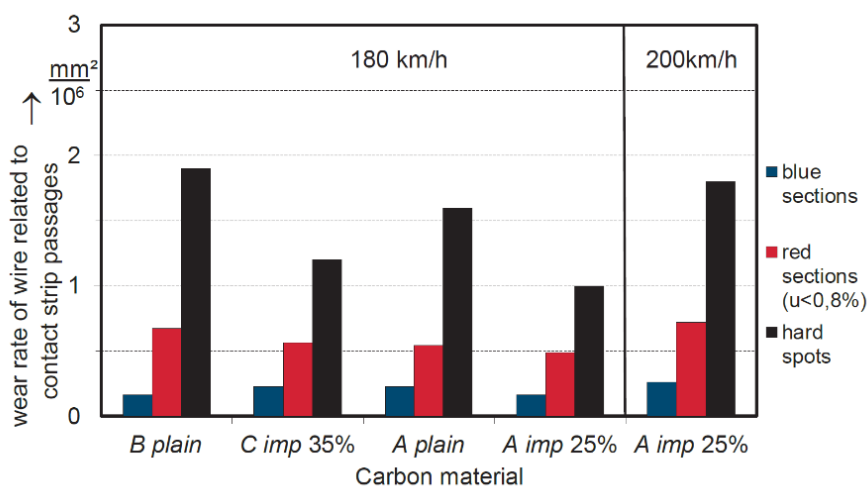


Abbildung 42: Fahrdrabtverschleiß bei verschiedenen Materialien der Kontaktstreifen, entnommen aus [25]

Bei allen Materialien des Kontaktstreifens nimmt der Fahrdrabtverschleiß mit größerer Lichtbogenentstehung zu. An harten Stellen des Versuchsstandes wird noch höherer Verschleiß beobachtet. Ein Vergleich für die Geschwindigkeiten 180 km/h und 200 km/h bei gleichem Kontaktstreifenmaterial A imp 25% zeigt eine höhere Verschleißrate bei 200 km/h für die drei betrachteten Varianten harte Stelle, mehr und weniger Lichtbogenentstehung.

Einen Zusammenhang zwischen den Verschleißraten von Kontaktstreifen und Fahrdrabt zeigt nachfolgende Abbildung 43 [25].

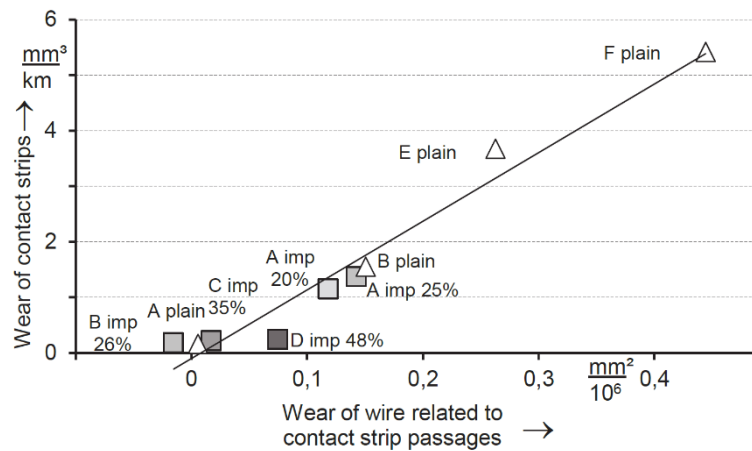


Abbildung 43: Zusammenhang von Kontaktstreifenverschleiß und Fahrdrabtverschleiß, entnommen aus [25]

Eine starke Korrelation der Verschleißraten von Kontaktstreifen und Fahrdrabt wird ersichtlich. Auditeau et al. [25] folgern, dass dieser Zusammenhang unabhängig vom Material des Kontaktstreifens ist und eine niedrige Verschleißrate des Kontaktstreifens ein Indikator für eine niedrige Verschleißrate des Fahrdrabtes ist.

Bucca und Collina [26] führen Prüfstandsversuche zum Verschleiß von Fahrdrähten aus Kupfer durch und verwenden die Ergebnisse zum Entwickeln und Anpassen eines Verschleißmodells. Das Modell für die Verschleißrate NWR ist in nachfolgender Gleichung (12) angegeben, wobei k_1 , k_2 und k_3 Gewichtungskoeffizienten, F_m der Mittelwert der Kontaktkraft, F_0 ein Referenzwert für die Kontaktkraft, I_c der nominelle elektrische Strom, I_0 ein Referenzwert für den elektrischen Strom, H die Materialhärte, V die Gleitgeschwindigkeit, u der prozentuale Anteil der Kontaktverluste, V_a die Lichtbogenspannung, ρ die Dichte, H_m die Schmelzenthalpie, R_c der elektrische Kontaktwiderstand sowie α und β Koeffizienten sind. Der elektrische Kontaktwiderstand wird abhängig vom Mittelwert der Kontaktkraft gemäß der nachfolgenden Gleichung beschrieben. Die Gleichung für NWR besteht aus drei Teilen, die addiert werden. Der erste Teil repräsentiert den mechanischen Anteil des Verschleißes infolge Reibung, der zweite Teil steht für den elektrischen Verschleiß durch den Joule Effekt und der dritte Teil gibt den Einfluss vorhandener Lichtbögen wieder. Gleichung (13) beschreibt den elektrischen Kontaktwiderstand R_c in Abhängigkeit des Mittelwerts der Kontaktkraft F_m . [26]

$$NWR = k_1 \left(\frac{1}{2} * \left(1 + \frac{I_c}{I_0} \right) \right)^{-\alpha} * \left(\frac{F_m}{F_0} \right)^\beta * \frac{F_m}{H} + k_2 \frac{R_c(F_m) * I_c^2}{H * V} * (1 - u) + k_3 u \frac{V_a I_c}{V H_m \rho} \quad (12)$$

$$R_c(F_m) = 0.013 + 0.09 * e^{-\frac{F_m - 14}{11}} \quad (13)$$

5.5 Zusammenfassung der Ergebnisse der Literaturrecherche

Die durchgeführte Literaturrecherche fokussiert den Einfluss der Kontaktkraft zwischen Stromabnehmer und Fahrdraht auf den Verschleiß des Fahrdrahts. Die Literatur gibt Parameter an, von denen der Fahrdrahtverschleiß abhängt, und kann qualitative Zusammenhänge zwischen diesen Parametern und dem Fahrdrahtverschleiß angeben. Neben den Zusammenhängen der Parameter mit dem Fahrdrahtverschleiß bestehen auch Wechselwirkungen der Parameter untereinander. Diese hohe Komplexität des Fahrdrahtverschleißes und qualitative Zusammenhang zwischen Kontaktkraft und Fahrdrahtverschleiß wird unter anderem in der Dissertation von Frank Pintscher [13] deutlich. Bei niedrigen Kontaktkräften dominiert der sogenannte elektrische Verschleiß infolge hoher Stromdichten bei vermindertem Anpressdruck und daraus folgender Lichtbogenbildung zwischen den Kontaktmaterialien. Bei hohen Kontaktkräften ist der mechanische Verschleiß durch Reibung zwischen Fahrdraht und Stromabnehmer dominant. Typischerweise nimmt der Verschleiß zwischen niedrigen und hohen Kontaktkräften ein Minimum an. Der Verschleiß in Abhängigkeit der Kontaktkraft zeigt einen U-förmigen Verlauf, wie beispielsweise Pintscher [13] angibt (Abbildung 28).

Der Verlauf der Kontaktkraft bei der Fahrt eines Zuges unter der Oberleitung ist nicht konstant, sondern schwankt durch Schwingungsanregung des Oberleitungs-Kettenwerks infolge Wellenausbreitung, Windanströmung von Stromabnehmer und Fahrdraht, veränderter Umgebungsbedingungen, Gleislageabweichungen und Eigenschwingungen des Fahrzeugs. Für die Beschreibung dieses Verlaufs werden statistische Kenngrößen der Kontaktkraft wie Mittelwert und Standardabweichung verwendet.

Quantitative Verschleißraten in Abhängigkeit der mittleren Kontaktkraft als statistische Größe kann die Literaturrecherche nicht liefern. Eine eindeutige Aussage, wie sich eine Erhöhung der mittleren Kontaktkraft auf den Fahrdrahtverschleiß konkret auswirkt, kann ebenfalls nicht gegeben werden. Jedoch weist die gesichtete Literatur darauf hin, dass sich kleinere Streuungen der Kontaktkraft vorteilhaft auf den Verschleiß auswirken. Damit wird deutlich, dass die Häufigkeit und Amplituden der Extremwerte im Kontaktkraftverlauf bedeutend für den lokalen Verschleiß sind. Ein gleichmäßigerer Kontaktkraftverlauf verringert den Verschleiß.

Aus Sicht des Infrastrukturbetreibers ist eine möglichst gleichmäßige Abnutzung des Fahrdrahtes von Interesse, da der am stärksten verschlissene Teil des Fahrdrahtes entscheidend für Instandhaltungsmaßnahmen und den Austausch ist. Daher ist bei der Ausführung von Fahrleitungen eine möglichst gleichförmige Elastizität entlang des Weges von Interesse. Kleine Änderungen der Elastizität entlang des Fahrdrahts können die Schwankungen der Kontaktkraft reduzieren. Dies wirkt dem ortsabhängigen Verschleiß des Fahrdrahtes entgegen.

Auf Prüfständen lassen sich bei der Ermittlung des Fahrdrahtverschleißes eine festgelegte konstante Kontaktkraft und andere Parameter wie Geschwindigkeit, Stromstärke und Fahrdrahtmaterial vorgeben. Teilweise sind Ergebnisse von Prüfstandsversuchen als relative Verschleißraten veröffentlicht. Zudem decken veröffentlichte Daten nicht alle relevanten Bereiche von Geschwindigkeit, Stromstärke und Kontaktkraft ab. Aus den Arbeiten von Puschmann et al. [1], Terfloth [14], Auditeau et al. [25] und dem Bericht zum Projekt ENUBA [18] geht hervor, dass die absoluten

Verschleißraten von Prüfstandsversuchen um eine Größenordnung oder teilweise bis zu zwei Größenordnungen geringer als Verschleißraten auf realen Strecken sein können. Insbesondere wegen der möglichen deutlichen Abweichung zwischen den Verschleißraten unter Prüfstandsbedingungen und unter Bedingungen auf der realen Strecke ist eine Abschätzung des Verschleißes beziehungsweise der Lebensdauer des Fahrdrahtes kaum möglich. Deswegen erscheint eine Prognose des Fahrdrahtverschleißes beziehungsweise der Fahrdrahtlebensdauer in LBT und GBT auf Basis von Verschleißraten aus Prüfstandsversuchen nicht sinnvoll. Analog erscheint die Anwendung des Verschleißmodells von Bucca und Collina [26] nicht sinnvoll, da dieses Modell an Verschleißdaten aus Prüfstandsmessungen angepasst wird. Prüfstandsversuche sind geeignet, um qualitative Zusammenhänge zu untersuchen, etwa der Vergleich verschiedener Fahrdrahtmaterialien unter gleichen Versuchsbedingungen.

Nur wenige Daten zu Verschleißmessungen auf realen Strecken wurden im Rahmen dieser Literaturrecherche gefunden. Für die Verschleißmessungen und die Zeiträume, in denen der Verschleiß entstanden ist, liegen keine genauen Daten hinsichtlich der bei der Durchfahrt der Stromabnehmer unter dem Fahrdraht vorherrschenden Kontaktkräfte, Stromstärken und Fahrgeschwindigkeiten vor. Daher kann aus den Messungen auf realen Strecken keine Prognose, wie sich der Verschleiß des Fahrdrahtes durch eine Erhöhung der mittleren Kontaktkraft von 120 N auf 130 N ändert, erstellt werden. Für einen silberlegierten Fahrdraht wird von Kießling et al. [20] eine Verschleißrate von $8 \text{ mm}^2 / 10^6$ Stromabnehmerdurchgänge angegeben. Puschmann et al. [1] thematisieren die von Puschmann und Kaschky [19] bei magnesiumlegierten Fahrdrähten durchgeführten Verschleißmessungen, wobei Puschmann et al. [1] für die Strecke Frankfurt-Köln eine Verschleißrate von $3,8 \text{ mm}^2 / 10^6$ Stromabnehmerdurchgänge für die Fahrdrahtklemme am Z-Seil und eine Verschleißrate von $1,9 \text{ mm}^2 / 10^6$ Stromabnehmerdurchgänge an Hängerklemmen angeben. Valide spezifische Verschleißwerte liegen im Bereich von $4 \dots 8 \text{ mm}^2$ pro 10^6 STR-Durchgänge für vergleichbare Oberleitungskonstruktionen mit CuAg-Fahrdrähten

In der Arbeit von Hauben und Vandepitte [22] wurden bei Messfahrten auf einer Hochgeschwindigkeitsstrecke der Verlauf der Kontaktkraft und die Entstehung von Lichtbögen aufgezeichnet. Eine Gegenüberstellung der Histogramme der Messfahrten mit den zugehörigen Ergebnissen der Lichtbogenentstehung zeigt, dass kleinere Werte der minimalen Kraft (F_{\min}) beziehungsweise des statistischen Minimums der Kraft ($F_{m-3\sigma}$) die Entstehung von Lichtbögen begünstigen. Analog treten Lichtbögen vermehrt bei höheren Werten von σ/F_m auf. Die Betrachtung der Histogramme zeigt, dass Lichtbögen bei breiteren Histogrammen mit größerer Streuung der Kontaktkraft häufiger auftreten.

In der Literatur werden Stellen genannt, an denen vermehrter Fahrdrahtverschleiß zu beobachten beziehungsweise zu erwarten ist. Dies ist etwa bei Zwangspunkten, Fehlerstellen, Knicken, Welligkeiten und harten Punkten bei Massenanhäufungen der Fall. Auch in der Nähe von Einbauten wie Streckentrennern, Isolatoren, Klemmen kann verstärkter Verschleiß auftreten. Stellen mit hohen Maxima, niedrigen Minima oder hohen Streuungen der Kontaktkraft sind anfälliger für Verschleiß. Eine Simulation im Buch von Puschmann et al. [1] zeigte Kontaktkraftmaxima im Bereich von Stützpunkten und erstem Hänger. In Beschleunigungs- und Steigungsbereichen kann durch

erhöhte Leistungsaufnahme stärkerer elektrischer Verschleiß auftreten. In Bereichen, in denen Lichtbögen auftreten, kann deutlicher Verschleiß auftreten. In der Arbeit von Puschmann und Kaschky [19] wird in Fahrdrhtkreuzungen deutlich erhöhter Verschleiß und eine deutlich verringerte Lebensdauer gefunden, wofür als Ursache unter anderem Lichtbogenentstehung genannt wird. Diese Stellen unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Lebensdauer allerdings signifikant von allen anderen Verschleißbereichen.

Bei einer Erhöhung der maximal zulässigen Fahrgeschwindigkeit kann vermehrter Verschleiß nicht ausgeschlossen werden. Die Kontaktkraft ist abhängig von der Fahrgeschwindigkeit. Bei höherer Fahrgeschwindigkeit können höhere Maximalwerte und kleinere Minimalwerte der Kontaktkraft auftreten, zudem kann die Streuung der Kontaktkraft größer werden, wie es in der von Puschmann et al. [1] angegebenen Simulation zu sehen ist. Dies kann Verschleiß fördern.

6 Betrachtung von Fahrdrabtrestdicken

6.1 Fahrdrabtrestdicken im GBT

6.1.1 Grafische Darstellung der Fahrdrabtrestdicken im GBT

Im Rahmen von Untersuchungen des Fahrdrahtes werden im GBT die Restdicken des Fahrdrahtes in Millimetern ermittelt. In den vorliegenden zur Verfügung gestellten tabellarischen Daten sind unter anderem die Spalten „Linie“, „Linienkilometer [km]“, „Aktuellstes Messdatum“ und „Restdicke (niedrigster Fahrdraht) [mm]“ vorhanden. Es wird davon ausgegangen, dass „Restdicke (niedrigster Fahrdraht) [mm]“ die zum Zeitpunkt „Aktuellstes Messdatum“ ermittelte Fahrdrabtrestdicke an der Stelle „Linienkilometer [km]“ ist. Aufeinander folgende Einträge in „Linienkilometer [km]“ haben in der Regel einen Abstand von 0,01. Dies entspricht einem Abstand zwischen zwei Messwerten der Fahrdrabtrestdicke in der Regel von 10 Metern. Es liegen Daten aus den Jahren 2022 bis 2025 vor.

Auf eine Anfrage hin wurde für die Messungen der Restdicke des Fahrdrahtes eine Messunsicherheit von $\pm 0,2$ mm (95 Perzentil bei einer Restdicke von $> 70\%$) benannt, wobei Fertigungstoleranzen des Fahrdrahtes zusätzliche Messunsicherheit verursachen können (E-Mail von Matthias Dürr vom 16. September 2025). Im Rahmen dieser Betrachtung von Verschleißmessungen wird die Messunsicherheit mit $\pm 0,2$ mm angenommen und ausschließlich Messungen der Linie 594 des GBT (Weströhre) einbezogen.

Die gemessenen Fahrdrabtdicken der Linie 594 der Jahre 2022 bis 2025 sind in Abbildung 44 dargestellt und über den Linienkilometern aufgetragen. Diese Messungen unterscheiden sich teilweise in den betrachteten Bereichen der Linienkilometer. Die Messung 2024-11-09 besteht aus nur einem Punkt. Die Messungen 2023-07-22 und 2023-12-09 wurden an unterschiedlichen Orten aufgenommen.

In Abbildung 44 ist zu sehen, dass sich die Bereiche der Linienkilometer 218 bis 219,7, 221,2 bis 222,1, 232,55 bis 232,8 und 238,9 bis 240,25 im GBT durch kleinere Werte der ermittelten Fahrdrabtrestdicken von anderen Bereichen unterscheiden. In den Bereichen 221,6 bis 222,1 und 232,55 bis 232,8 zeigen sich die kleineren ermittelten Fahrdrabtrestdicken in zwei Messungen unterschiedlicher Zeitpunkte. Dieser lokale Verschleiß tritt über mehrere Hundert Meter auf.

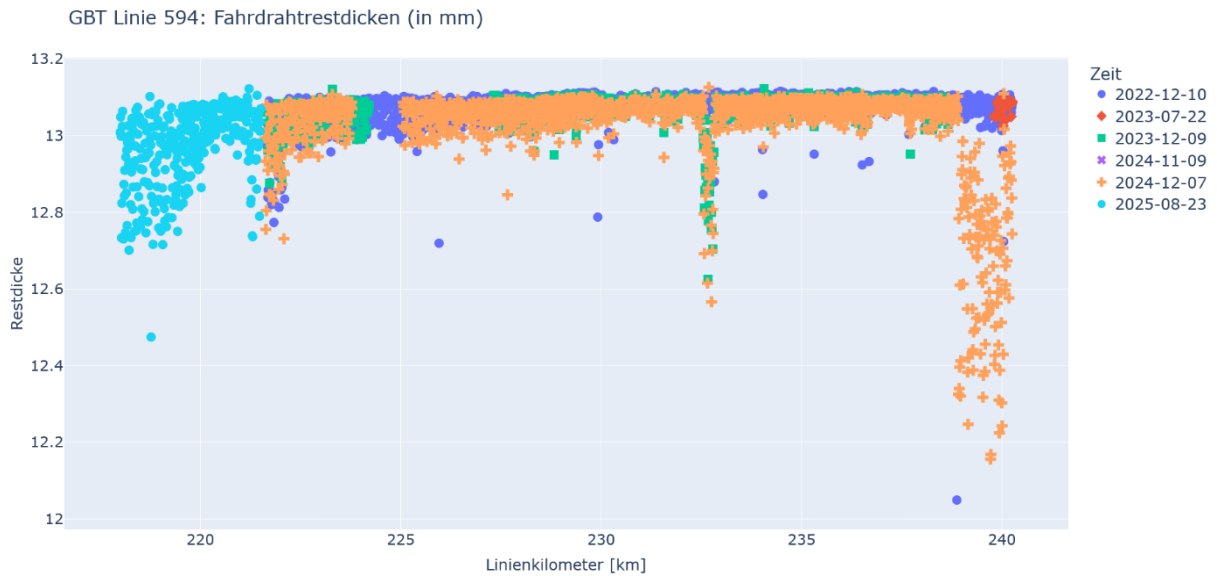


Abbildung 44: Ermittelte Fahrdrabtrestdicken im GBT zwischen 2022 und 2025

Ein Vergleich der Restdicken der Messungen 2024-12-07 und 2025-08-23 in Abbildung 45 zeigt, dass die Messung 2025-08-23 im Bereich von Linienkilometer 221,6 bis 229 die gleichen Werte wie die Messung 2024-12-07 hat (rote Punkte und blaue Kreuze überlagern sich in diesem Bereich). Dies deutet auf eine fehlerhafte Zuordnung von Fahrdrabtdicken und Jahr hin, wobei unklar ist, ob diese Fahrdrabtdicken im Bereich von Linienkilometer 221,6 bis 229 zum Jahr 2024 oder 2025 gehören.

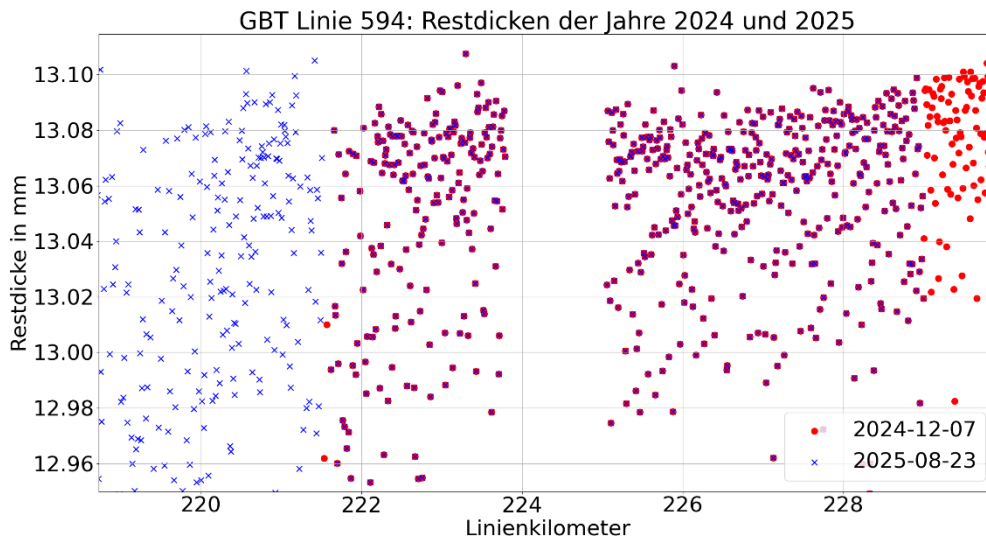


Abbildung 45: Restdicken der Messungen 2024-12-07 und 2025-08-23 im GBT

Abbildung 46 zeigt in 2022 bis 2024 ermittelte Restdicken des Fahrdrahtes in einem Ausschnitt des GBT. Erwartet wird ein monotones Absinken der Restdicke des Fahrdrahtes mit steigender Anzahl an Stromabnehmerdurchgängen infolge von Fahrdrahtverschleiß. Dementsprechend wird ein monotones Absinken der Restdicke des Fahrdrahtes mit der Zeit erwartet. Hingegen zeigt der in Abbildung 46 dargestellte exemplarische Ausschnitt des GBT an mehreren Orten eine Zunahme der Restdicke des Fahrdrahtes mit der Zeit. Eine mögliche Ursache für dieses unplausible Zunehmen der Fahrdrahtrestdicke mit der Zeit kann die Messunsicherheit der Messungen sein.

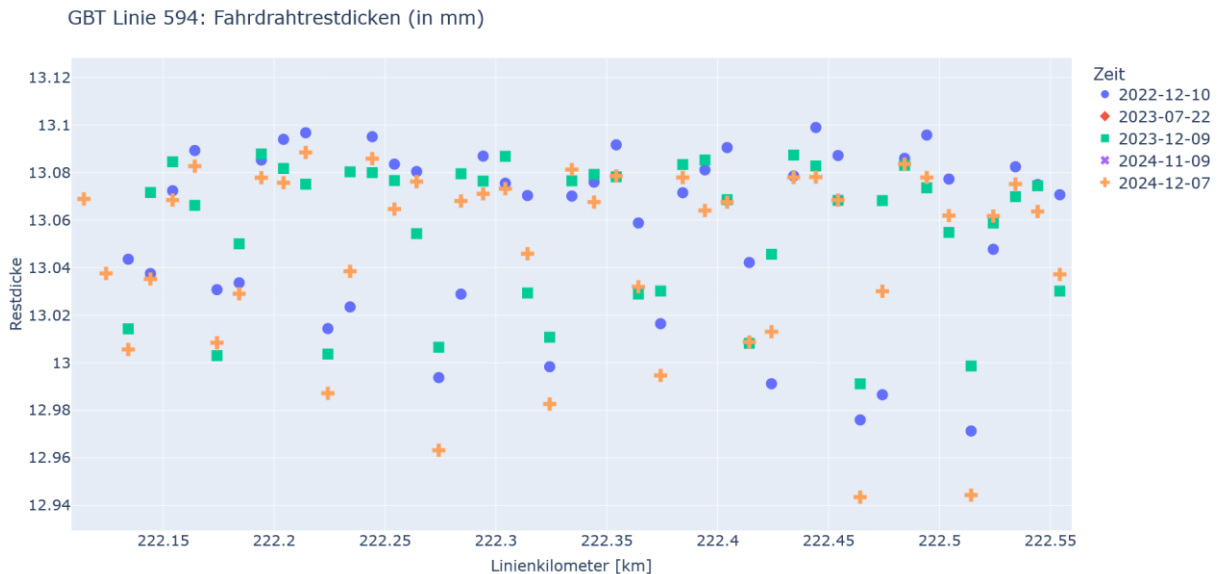


Abbildung 46: Fahrdrahtrestdicken in einem Abschnitt des GBT

6.1.2 Tendenzielle Veränderung des Fahrdrahtquerschnitts im GBT

Puschmann et al. [1, p. 1475] geben in Abbildung 47 [1] eine grafische Veranschaulichung des Verschleißes des Querschnitts eines Rillenfahrdrahtes der Ausführung AC. Dabei sind d der Durchmesser des Fahrdrahtes, h_{Re} die Fahrdrahtresthöhe und A_{wear} die Verschleißfläche.

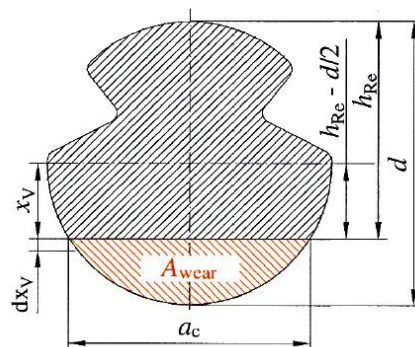


Abbildung 47: Verschleiß des Querschnitts eines Rillenfahrdrahtes der Ausführung AC, entnommen aus [1]

Puschmann et al. [1, p. 1476] geben mit Gleichung (14) eine Methode zur Ermittlung der Verschleißfläche A_{wear} anhand der Fahrdrahtresthöhe h_{Re} und des Fahrdrahtdurchmessers d an:

$$A_{wear} = \left(\frac{d^2}{4}\right) * \left[\frac{\pi}{2} - \arcsin\left(2\frac{h_{Re}}{d} - 1\right)\right] - \left(h_{Re} - \frac{d}{2}\right) * \sqrt{h_{Re} * (d - h_{Re})} \quad (14)$$

Mit $\pi/2 - \arcsin(x) = \arccos(x)$ lässt sich Gleichung (14) in Gleichung (15) überführen [1, p. 1477]:

$$A_{wear} = \left(\frac{d^2}{4}\right) * \arccos\left(2\frac{h_{Re}}{d} - 1\right) - \left(h_{Re} - \frac{d}{2}\right) * \sqrt{h_{Re} * (d - h_{Re})} \quad (15)$$

Eine detaillierte Dokumentation zu den ermittelten Werten der Größe „Restdicke (niedrigster Fahrdraht) [mm]“ liegt nicht vor und es wird im Folgenden davon ausgegangen, dass diese Größe der Fahrdrahtresthöhe h_{Re} aus Abbildung 47

entspricht. Des Weiteren wird für den GBT ein AC120 Fahrdraht mit einer initialen unverschlissenen Querschnittsfläche von 120 mm² und einem initialen unverschlissenen Durchmesser von 13,2 mm angenommen. Anhand von Gleichung (14) werden mit den Werten der Größe „Restdicke (niedrigster Fahrdraht) [mm]“ und dem angenommenen initialen Durchmesser von 13,2 mm Verschleißflächen berechnet.

Im Gotthard-Basis-Tunnel ereignete sich am 10. August 2023 ein Unfall, was den Betrieb in den Tunnelröhren beeinträchtigte. Am 02. September 2024 konnte der Betrieb wieder vollständig aufgenommen werden. Informationen, inwiefern auf der Linie 594 des GBT Betrieb stattgefunden hat, liegen nicht vor. Es wird daher die Annahme getroffen, dass zwischen 10. August 2023 und 02. September 2024 auf dem gesamten betrachteten Bereich der Linie 594 des GBT kein Betrieb und keine Stromabnehmerdurchgänge stattgefunden haben.

In den vorliegenden Daten zeigen die Messungen der Jahre 2024 und 2025 im Bereich von Linienkilometer 221,6 bis 229 die gleichen Werte für die ermittelten Fahrdrahtrestdicken (vergleiche Abbildung 45). Eine fehlerhafte Zuordnung von Jahr und Werten der Fahrdrahtrestdicke kann nicht ausgeschlossen werden. Deswegen werden für die nachfolgende Ermittlung einer Tendenz für die Entwicklung der Fahrdrahtrestdicke nur die Werte der Jahre 2022 und 2023 einbezogen.

Da ein detailliertes Betriebsprogramm mit Zugfahrten und Stromabnehmerdurchgängen nicht vorliegt, wird eine Annahme bezüglich der Stromabnehmerdurchgänge pro Stunde getroffen. Es wird angenommen, dass im betrachteten Zeitraum fünf Stromabnehmerdurchgänge pro Stunde stattgefunden haben.

Mit Gleichung (14) und dem angenommenen initialen Fahrdrahtdurchmesser von 13,2 mm wird für jede Fahrdrahtrestdicke eine Verschleißfläche ermittelt.

Für Orte, an denen Fahrdrahtrestdicken aus 2022 und 2023 vorhanden sind, kann eine Tendenz, wie sich der Verschleiß des Fahrdrahtquerschnitts zwischen den beiden Messungen verändert hat, abgeleitet werden. Dafür wird eine Gerade mit der Methode

der kleinsten Quadrate angepasst. Bei zwei Punkten ergibt sich eine Gerade, die die beiden Punkte verbindet. Für jeden Wert der Fahrdrahtrestdicke wird eine Messunsicherheit von $\pm 0,2$ mm angenommen. Damit ist eine obere beziehungsweise untere Grenze für die Fahrdrahtrestdicke gegeben. Auf Basis dieser beiden Grenzen kann analog zum Vorgehen für die Umrechnung der Fahrdrahtrestdicken in Verschleißflächen mit Gleichung (14) jeweils eine obere und untere Grenze für die Verschleißfläche bestimmt werden. Aus der oberen Grenze der Fahrdrahtdicke wird die untere Grenze für die Verschleißfläche berechnet. Entsprechend wird aus der unteren Grenze der Fahrdrahtdicke die obere Grenze für die Verschleißfläche bestimmt. Eine Addition der angenommenen Messunsicherheit von $0,2$ mm zu den Fahrdrahtrestdicken führt teilweise zu oberen Grenzen der Fahrdrahtrestdicke größer $13,2$ mm. Ein Wachsen Fahrdrahtrestdicke durch Verschleiß ist nicht plausibel, weshalb Fahrdrahtrestdicken größer als der angenommene initiale Fahrdrahtdurchmesser von $13,2$ mm ebenfalls unplausibel sind. Deshalb werden für Werte der Fahrdrahtrestdicke größer $13,2$ mm eine Verschleißfläche von 0 mm² angesetzt.

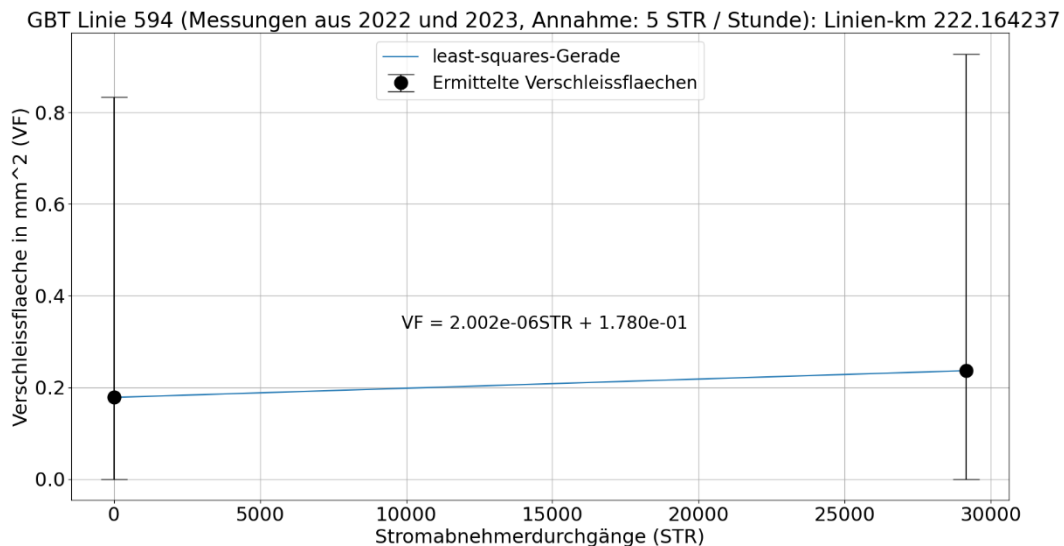


Abbildung 48: Zunahme der Verschleißfläche mit steigender Anzahl an Stromabnehmerdurchgängen (Annahme: 5 Stromabnehmerdurchgänge pro Stunde)

In Abbildung 48 ist das Vorgehen für einen exemplarische Ort im GBT (Linienkilometer 222,164237) dargestellt. Für die ermittelten Verschleißflächen (linker Punkt aus 2022, rechter Punkt aus 2023) ist jeweils ein Fehlerkreuz eingezeichnet, das die untere und obere Grenze für die Verschleißfläche kennzeichnet. Die aus den Messungen des Jahres 2022 resultierenden Verschleißflächen werden jeweils als Beginn der Betrachtung genutzt, weshalb sie bei null Stromabnehmerdurchgängen liegen. Für die Messungen des Jahres 2023 werden die Anzahl der Stromabnehmerdurchgänge seit der Messung im Jahr 2022 mit Hilfe der Annahme von 5 Stromabnehmerdurchgängen pro Stunde geschätzt (für den Zeitraum von 10. August 2023 und 02. September 2024 werden keine Stromabnehmerdurchgänge angenommen). In Abbildung 48 ist die Geradengleichung der least-squares-Gerade, die die beiden ermittelten

Verschleißflächen verbindet, angegeben. Die Steigung der Geraden zeigt eine Zunahme der Verschleißfläche von $2,002 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^2$ pro Stromabnehmerdurchgang.

Die teilweise auftretenden unplausiblen Zunahmen der Fahrdrabtrestdicke mit zunehmender Zeit (siehe Abbildung 46) zeigen sich auch bei der Bestimmung einer Tendenz für die Änderung der Verschleißfläche. Ein unplausibles Sinken der Verschleißfläche mit steigender Anzahl an Stromabnehmerdurchgängen ist in Abbildung 49 exemplarisch dargestellt. Die Gerade weist eine unplausible negative Steigung auf.

Die Unsicherheit der ermittelten Verschleißflächen ist im Verhältnis zur Änderung der Verschleißfläche zwischen den beiden Messzeitpunkten hoch. Sowohl in Abbildung 48 als auch Abbildung 49 wären im Rahmen der Unsicherheiten der Verschleißflächen andere Geraden mit anderen Steigungen möglich.

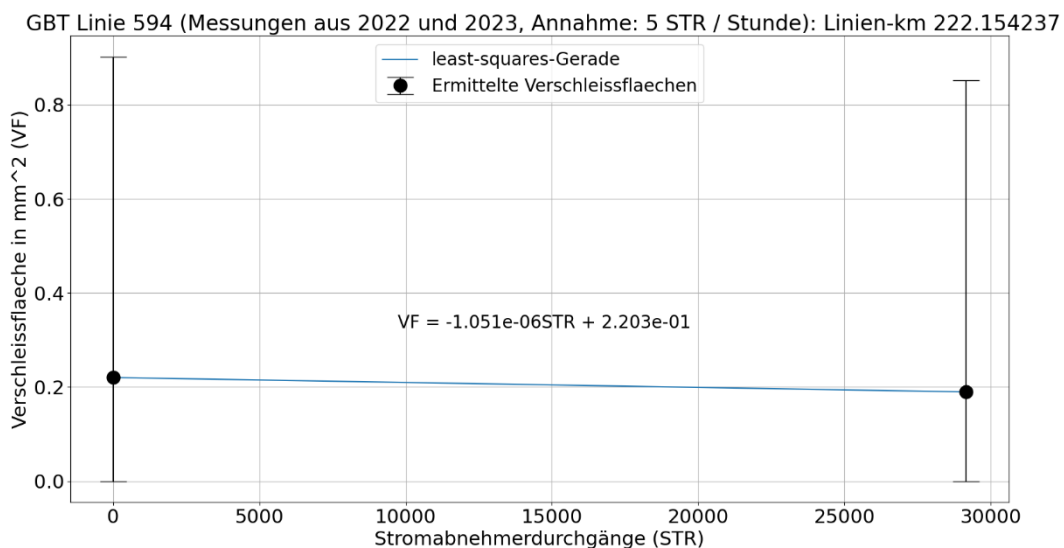


Abbildung 49: Sinken der Verschleißfläche mit steigender Anzahl an Stromabnehmerdurchgängen (Annahme: 5 Stromabnehmerdurchgänge pro Stunde)

Analog zum in Abbildung 48 und Abbildung 49 für die Orte Linienkilometer 222,164237 und 222,154237 dargestellten Vorgehen werden für alle Orte in GBT Linie 594, für die Messungen aus 2022 und 2023 vorhanden sind, Geraden für die Änderung der Verschleißfläche gebildet. Die Steigungen dieser Geraden beschreiben die Änderung der Verschleißfläche pro Stromabnehmerdurchgang. Die Häufigkeit der Steigungen der Geraden sind in Abbildung 51 enthalten. Das Histogramm ist so skaliert, dass der Bereich der größten Häufigkeit sichtbar wird. Die Häufigkeiten noch größerer beziehungsweise noch kleinerer Verschleißraten wurden der Übersichtlichkeit wegen nicht ins Histogramm mit aufgenommen. Im Histogramm sind negative Änderungen der Verschleißfläche pro Stromabnehmerdurchgang zu sehen. Dieser negative Verschleiß ist nicht plausibel. Die größten Häufigkeiten an Verschleißraten treten bei circa $0,4 \cdot 10^{-6}$ bis $0,6 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^2$ pro Stromabnehmerdurchgang auf (Annahme 5 Stromabnehmerdurchgänge pro Stunde). In der durchgeführten Literaturrecherche wurde eine unter Betriebsbedingungen ermittelte Verschleißrate von 8 mm^2 pro 10^6

Stromabnehmerdurchgänge für einen Silber-legierten Fahrdrabt gefunden. Die für den GBT geschätzten Verschleißraten mit größter Häufigkeit sind deutlich kleiner (die Verschleißraten mit größter Häufigkeit liegen bei circa $0,4 \cdot 10^{-6}$ bis $0,6 \cdot 10^{-6}$ mm² pro Stromabnehmerdurchgang und sind damit um mehr als eine Größenordnung kleiner als die Verschleißrate von 8 mm² pro 10⁶ Stromabnehmerdurchgänge aus der Literatur). Daher sind erhaltenen Ergebnisse kritisch zu hinterfragen.

Um die Sensitivität der Ergebnisse bezüglich der angenommenen Stromabnehmerdurchgänge besser einschätzen zu können, wird das Vorgehen auch mit den Annahmen von 3 Stromabnehmerdurchgängen pro Stunde beziehungsweise 7 Stromabnehmerdurchgängen pro Stunde durchgeführt. Die zugehörigen Histogramme der Verschleißraten sind in Abbildung 50 und Abbildung 52 dargestellt (Fokus auf Bereich mit größter Häufigkeit).

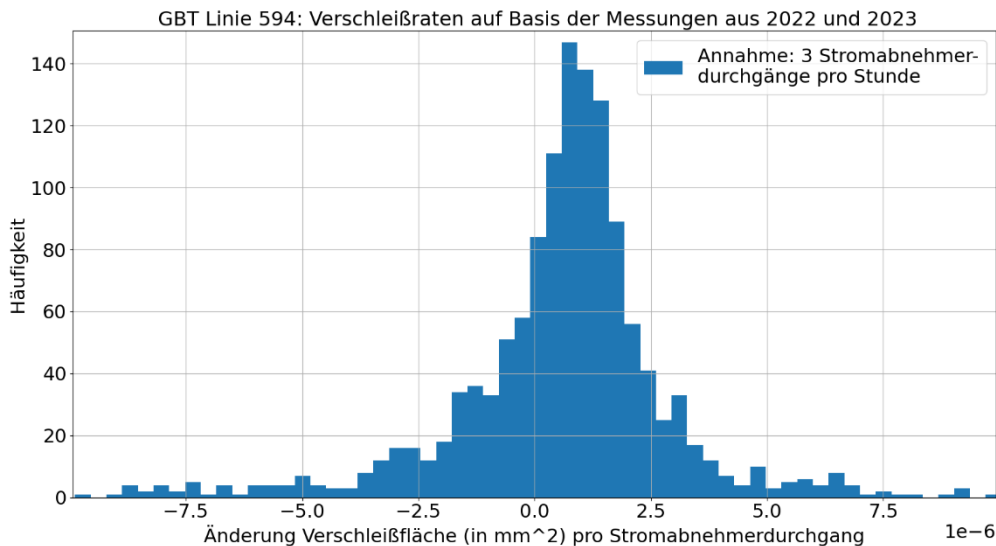


Abbildung 50: Histogramm der Verschleißraten im GBT (Annahme: 3 Stromabnehmerdurchgänge pro Stunde)

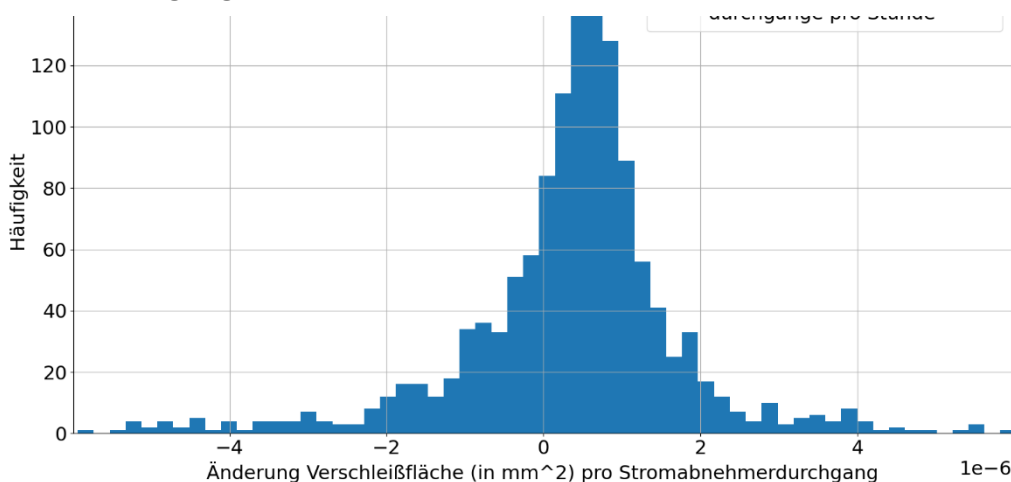


Abbildung 51: Histogramm der Verschleißraten im GBT (Annahme: 5 Stromabnehmerdurchgänge pro Stunde)

Unter der Annahme von 3 Stromabnehmerdurchgängen pro Stunde treten die größten Häufigkeiten an Verschleißraten bei circa $0,7 \cdot 10^{-6}$ bis $1,1 \cdot 10^{-6}$ mm² pro Stromabnehmerdurchgang auf. Wenn 7 Stromabnehmerdurchgängen pro Stunde angenommen werden, treten die größten Häufigkeiten an Verschleißraten bei circa $0,3 \cdot 10^{-6}$ bis $0,5 \cdot 10^{-6}$ mm² pro Stromabnehmerdurchgang auf. Es wird ersichtlich, dass die angenommenen Stromabnehmerdurchgänge pro Stunde deutlichen Einfluss auf die Ergebnisse haben. Dies zeigt die Bedeutung eines detaillierten Betriebsprogramms mit genauen Informationen zu stattgefundenen Zugfahrten und Stromabnehmerdurchgängen.

Das in diesem Unterkapitel vorgestellte Vorgehen zeigt einen Ansatz, um eine Tendenz bezüglich der Änderung der Verschleißfläche des Fahrdrahtes auf Basis der Messungen der Jahre 2022 und 2023 abzuleiten. Die erhaltenen Ergebnisse sind nicht statistisch gesichert, sondern lediglich auf Annahmen beruhende Tendenzen, weshalb sie für Prognosen von Verschleiß oder Lebensdauer des Fahrdrahtes nicht geeignet sind. Die hohe Messunsicherheit, die niedrige örtliche Auflösung und die geringe Anzahl der Messungen der Fahrdrahtrestdicken sowie die nur auf Annahmen basierende Anzahl an Stromabnehmerdurchgängen verhindern valide, statistisch gesicherte Ergebnisse.

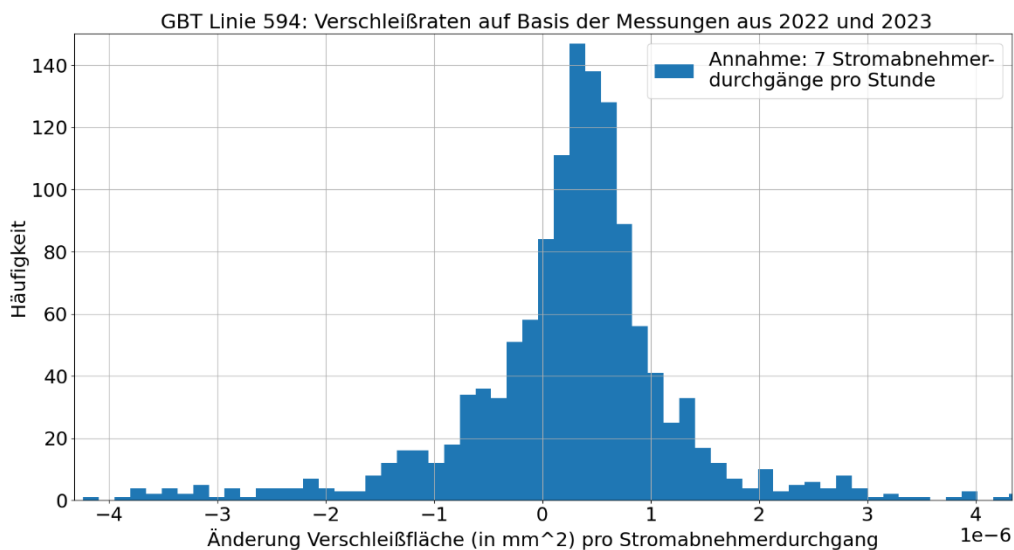


Abbildung 52: Histogramm der Verschleißraten im GBT (Annahme: 7 Stromabnehmerdurchgänge pro Stunde)

Teilweise ergeben sich negative Verschleißraten, die nicht plausibel sind. Eine größere Verschleißfläche mit zunehmenden Stromabnehmerdurchgängen beziehungsweise zunehmender Zeit wird erwartet. Bei Annahme von 5 Stromabnehmerdurchgängen pro Stunde liegen die häufigsten Verschleißraten bei circa $0,4 \cdot 10^{-6}$ bis $0,6 \cdot 10^{-6}$ mm² pro Stromabnehmerdurchgang. Dies ist deutlich kleiner als in der Literatur angegebene Verschleißraten unter Betriebsbedingungen (unter anderem 8 mm² pro 10⁶ Stromabnehmerdurchgänge für einen Silber-legierten Fahrdraht). Deshalb ist die Validität der Tendenz bezüglich der Änderung der Verschleißfläche des Fahrdrahtes anzuzweifeln.

Im Rahmen dieser Betrachtung wurden nur Messungen aus zwei Jahren miteinbezogen und die Fahrdrabtrestdicken, auf denen die Verschleißflächen basieren, weisen eine hohe Unsicherheit auf. Eine weitere Einschränkung der Aussagekraft ist durch die niedrige örtliche Auflösung der Fahrdrabtrestdicken (Werte im Abstand von rund 10 Meter) gegeben. Dadurch ist es möglich, dass verschleißintensive Stellen (zum Beispiel bei Stützpunkten oder bei Massenanhäufungen) oftmals nicht von den Orten der Fahrdrabtuntersuchungen erfasst werden. Ein detailliertes Betriebsprogramm mit genauen Informationen bezüglich Stromabnehmerdurchgängen liegt nicht vor, weshalb für die Anzahl an Stromabnehmerdurchgängen Annahmen getroffen werden. Ein Vergleich der Ergebnisse bei den Annahmen von 3, 5 und 7 Stromabnehmerdurchgängen pro Stunde zeigt den Einfluss auf die resultierenden Verschleißraten.

Um die Validität der Ergebnisse zu erhöhen, ist eine Einbeziehung von mehr Messungen sinnvoll. Somit kann die Verschleißgerade an eine größere Anzahl an Datenpunkten angepasst werden. Zudem lassen sich durch Nutzung genauer Informationen zu den Stromabnehmerdurchgängen anstelle von Annahmen Unsicherheiten hinsichtlich der Anzahl an Stromabnehmerdurchgängen reduzieren.

Untersuchungen des Fahrdrabtes mit einer höheren örtlichen Auflösung können eventuell mehr verschleißintensive Stellen erfassen. Eine Gegenüberstellung der ermittelten Fahrdrabtrestdicken des gleichen Abschnitts bei höherer und niedrigerer örtlicher Auflösung kann bei der Einschätzung des Einflusses der örtlichen Auflösung auf die Ergebnisse helfen.

6.1.3 Kontaktkraftmessungen und Fahrdrabtrestdicken des GBT

Für den GBT stehen Ergebnisse von Kontaktkraftmessungen in Tabellenform zur Verfügung. Darin enthalten sind unter anderem die Variablen „F_c“ und zweimal die Variable „data.lineoffset“, wobei die Werte der ersten Spalte „data.lineoffset“ um den Faktor 1000 größer sind als die Werte der zweiten Spalte „data.lineoffset“. Es wird davon ausgegangen, dass die Variable „F_c“ die Kontaktkraft und die zweite Spalte „data.lineoffset“ die Linienkilometer des GBT enthält

Abbildung 53 zeigt für einen Ausschnitt der Linie 594 im GBT die ermittelten Restdicken des Fahrdrabtes und eine exemplarische Messung der Kontaktkraft (Messung r0 bei Kniegang). Die Achsenbeschriftung data.lineoffset.1 bezeichnet den Linienkilometer (Benennung aus Kontaktkraftmessungen). In Bereich zwischen Linienkilometer 221,2 und 222 (rot hinterlegt) werden geringere Werte für die Fahrdrabtrestdicke ermittelt als im Bereich von Linienkilometer 220,4 bis 221,2 (blau hinterlegt). Für den Bereich zwischen Linienkilometer 221,2 und 222 liegen teilweise Ergebnisse mehrerer Messungen vor, in denen die im Vergleich zum Bereich zwischen Linienkilometer 220,4 bis 221,2 kleineren Fahrdrabtrestdicken ermittelt werden.

Eine Gegenüberstellung der Kontaktkraft in den beiden Bereichen kann anhand der Histogramme der Kontaktkraft des jeweiligen Bereichs vorgenommen werden. Für die Linie 594 im GBT stehen 16 Messungen der Kontaktkraft zur Verfügung, wobei acht Messungen mit Stromabnehmer im Kniegang und acht Messungen mit Stromabnehmer im Spießgang durchgeführt wurden. Zudem wurden bei den Messfahrten verschiedene Höchstfahrgeschwindigkeiten erreicht. Inwiefern die Messfahrten den realen Zugbetrieb abbilden können, ist nicht klar. Daher kann keine

der 16 Messungen als Referenz bestimmt werden und für alle 16 Messungen wird der Vergleich der Histogramme der Kontaktkraft in den beiden Bereichen vorgenommen.

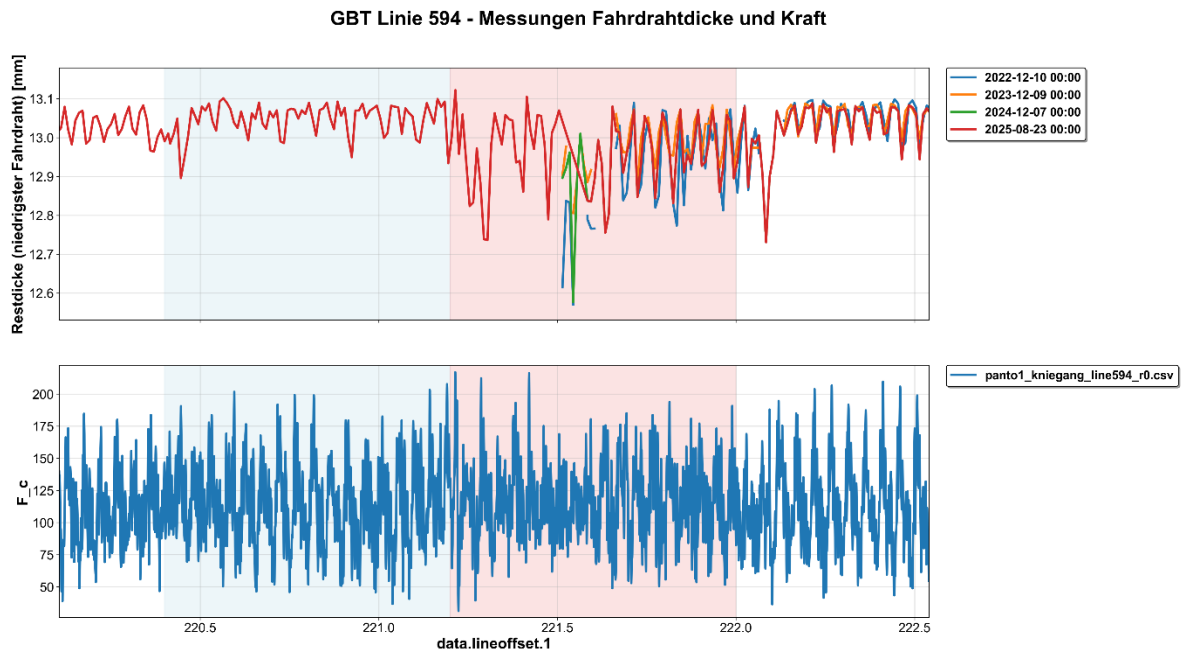


Abbildung 53: Vergleich Linienkilometer 220,4 bis 221,2 und Linienkilometer 221,2 bis 222 im GBT

In Abbildung 54 bis Abbildung 57 sind für die 16 Messungen die jeweils zugehörigen Histogramme der Kontaktkraft (F_c) der Linienkilometer 220,4 bis 221,2 beziehungsweise 221,2 bis 222 enthalten. In jedem Koordinatensystem sind für jeweils eine Messung die Histogramme der Kontaktkraft der Linienkilometerbereiche 220,4 bis 221,2 (blau dargestellt) und 221,2 bis 222 (rot dargestellt) enthalten. Zusätzlich sind in den Kästen statistische Parameter zur Kontaktkraft im jeweiligen Bereich enthalten. Die beiden betrachteten Bereiche haben jeweils die gleiche Länge von 800 Metern, weshalb sich die Anzahl (N) der Werte der Kontaktkraft in den Bereichen nur geringfügig unterscheidet. Bei den Messungen unterscheiden sich die Mittelwerte (Mittel) der Kontaktkraft in den beiden Bereichen um maximal rund 2,2 Newton (Messung panto2_spiessgang_line594_r2.csv). Mit Ausnahme der Messung panto2_spiessgang_line594_r4.csv liegt die Standardabweichung σ im Bereich von Linienkilometer 220,4 bis 221,2 höher als im Bereich von Linienkilometer 221,2 bis 222. Außer bei den Messungen panto2_spiessgang_line594_r0.csv und panto2_spiessgang_line594_r4.csv zeigt das statistische Minimum $\mu - 3\sigma$ im Linienkilometerbereich 221,2 bis 222 höhere Werte als im Linienkilometerbereich 220,4 bis 221,2. Das statistische Maximum $\mu + 3\sigma$ zeigt bei allen 16 Messungen höhere Werte im Linienkilometerbereich 220,4 bis 221,2 als im Linienkilometerbereich 221,2 bis 222.

In der Arbeit von Pintscher [13] wird stärkerer Verschleiß des Fahrdrathes mit niedrigeren Kontaktkräften und Lichtbogenbildung beziehungsweise höheren Kontaktkräften und verstärkter Reibung in Verbindung gebracht. Die gefundene

Literatur deutet darauf hin, dass höhere Kontaktkraftmaxima, niedrigere Kontaktkraftminima und größere Streuung der Kontaktkraft höheren Fahrdrabtverschleiß begünstigen. Der unterschiedliche Verschleiß in den Linienkilometerbereichen 220,4 bis 221,2 und 221,2 bis 222 kann über diese Zusammenhänge von Fahrdrabtverschleiß und Kontaktkraft aus der Literatur nicht erklärt werden. Der Bereich mit niedrigeren Fahrdrabrestdicken hat in den meisten der 16 Messungen eine geringere Streuung der Kontaktkraft sowie höhere Werte für das statistische Minimum der Kontaktkraft. Zudem hat der Bereich mit niedrigeren Fahrdrabrestdicken in allen 16 Messungen kleinere Werte für das statistische Maximum der Kontaktkraft.

Die Ursachen der niedrigeren Fahrdrabrestdicken zwischen Linienkilometer 221,2 bis 222 können nicht benannt werden. Bei der Untersuchung der Hintergründe dieser niedrigeren Fahrdrabrestdicken könnten Oberleitungslagepläne hilfreich sein, um einzuschätzen, inwiefern konstruktive Gegebenheiten Einfluss haben können. Auch typische Geschwindigkeitsprofile von Zügen bei der Durchfahrt des Abschnitts könnten nützen, um beispielsweise einzuschätzen, ob in diesem Abschnitt typischerweise beschleunigt wird.

GBT Linie 594 - Histogramme Kraftmessungen in 2 Bereichen

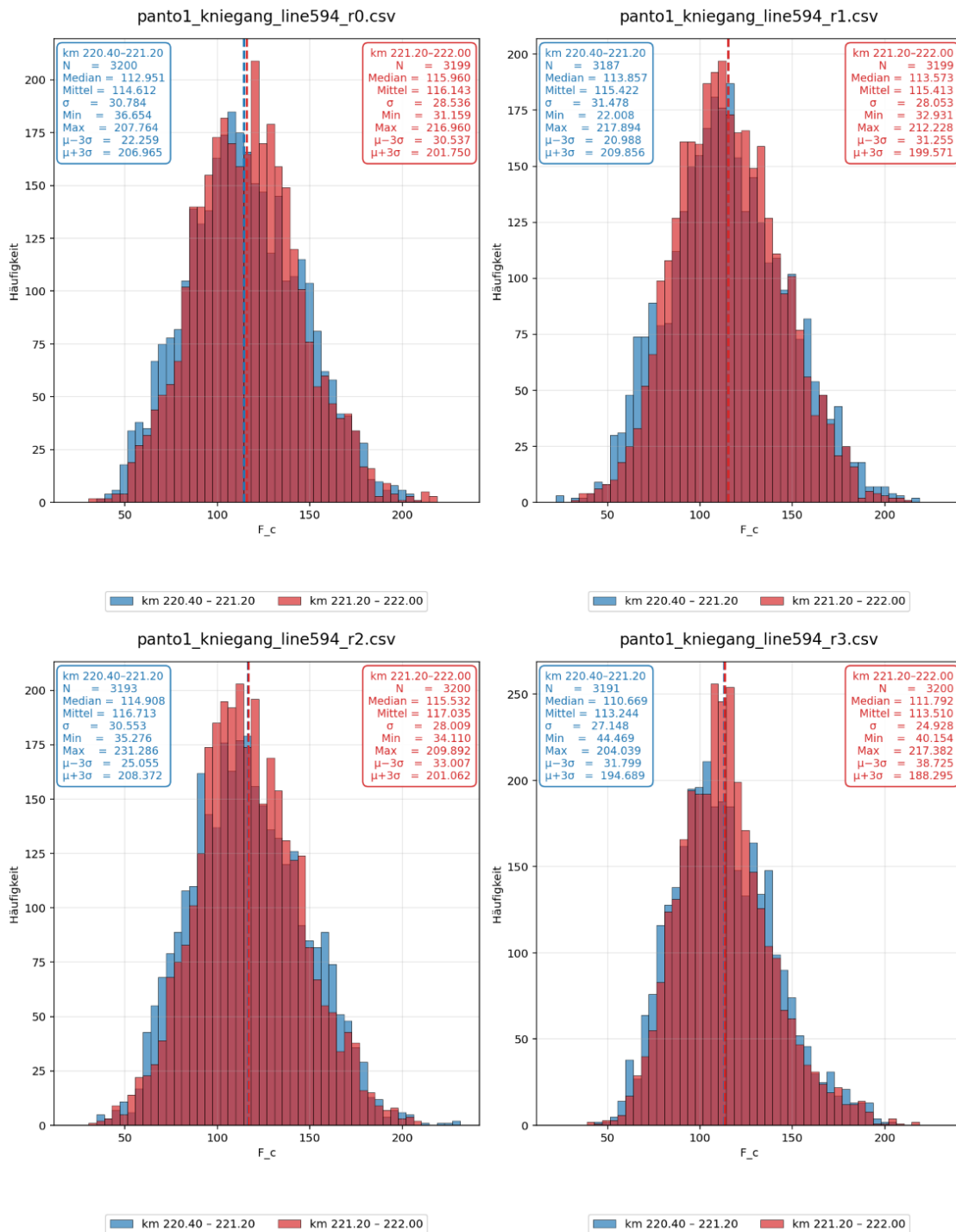


Abbildung 54: Messungen mit Stromabnehmer im Kniegang r0, r1, r2 und r3: Histogramme der Kontaktkraft in den Linienkilometerbereichen 220,4 bis 221,2 und 221,2 bis 222

GBT Linie 594 - Histogramme Kraftmessungen in 2 Bereichen

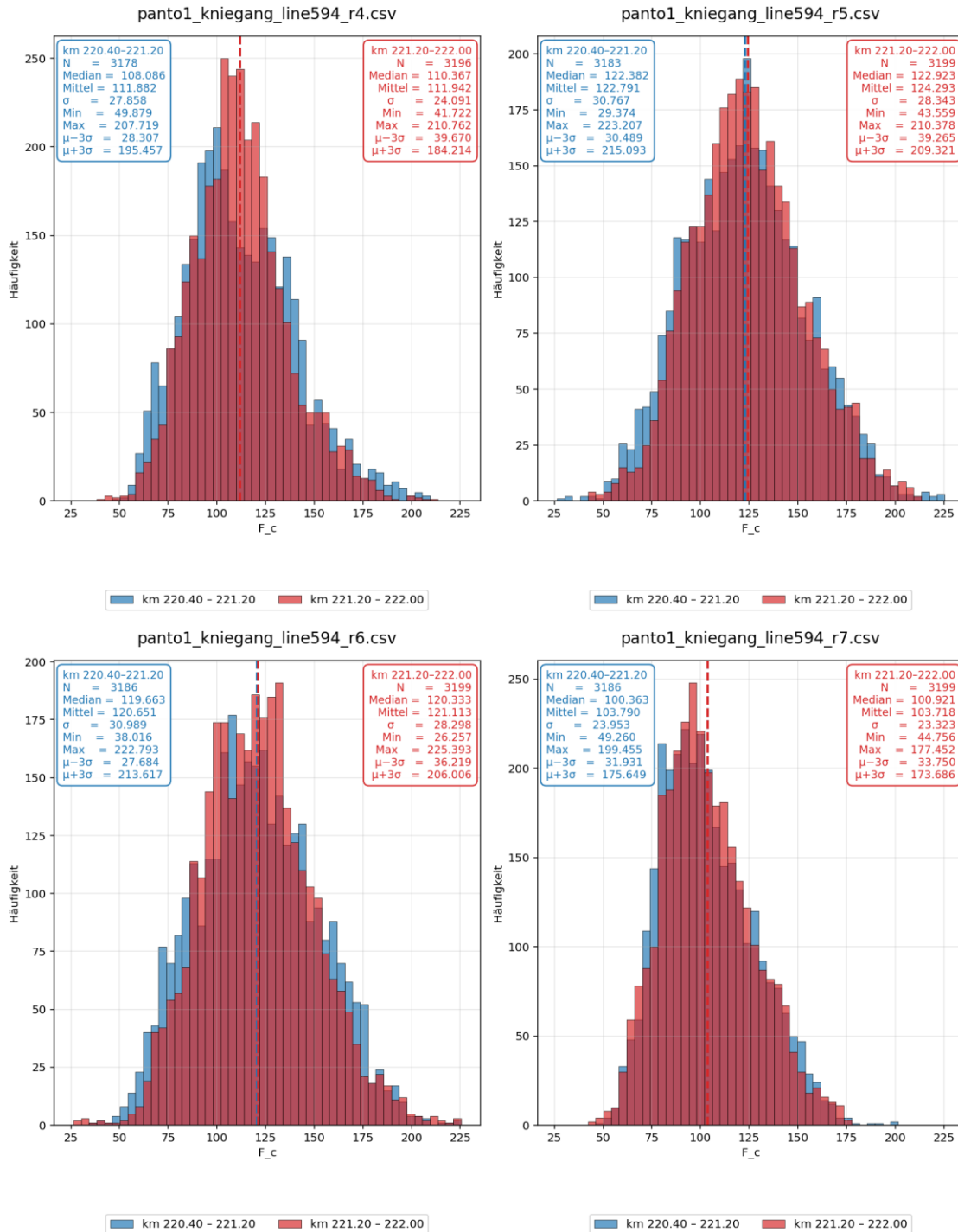


Abbildung 55: Messungen mit Stromabnehmer im Kniegang r4, r5, r6 und r7: Histogramme der Kontaktkraft in den Linienkilometerbereichen 220,4 bis 221,2 und 221,2 bis 222

GBT Linie 594 - Histogramme Kraftmessungen in 2 Bereichen

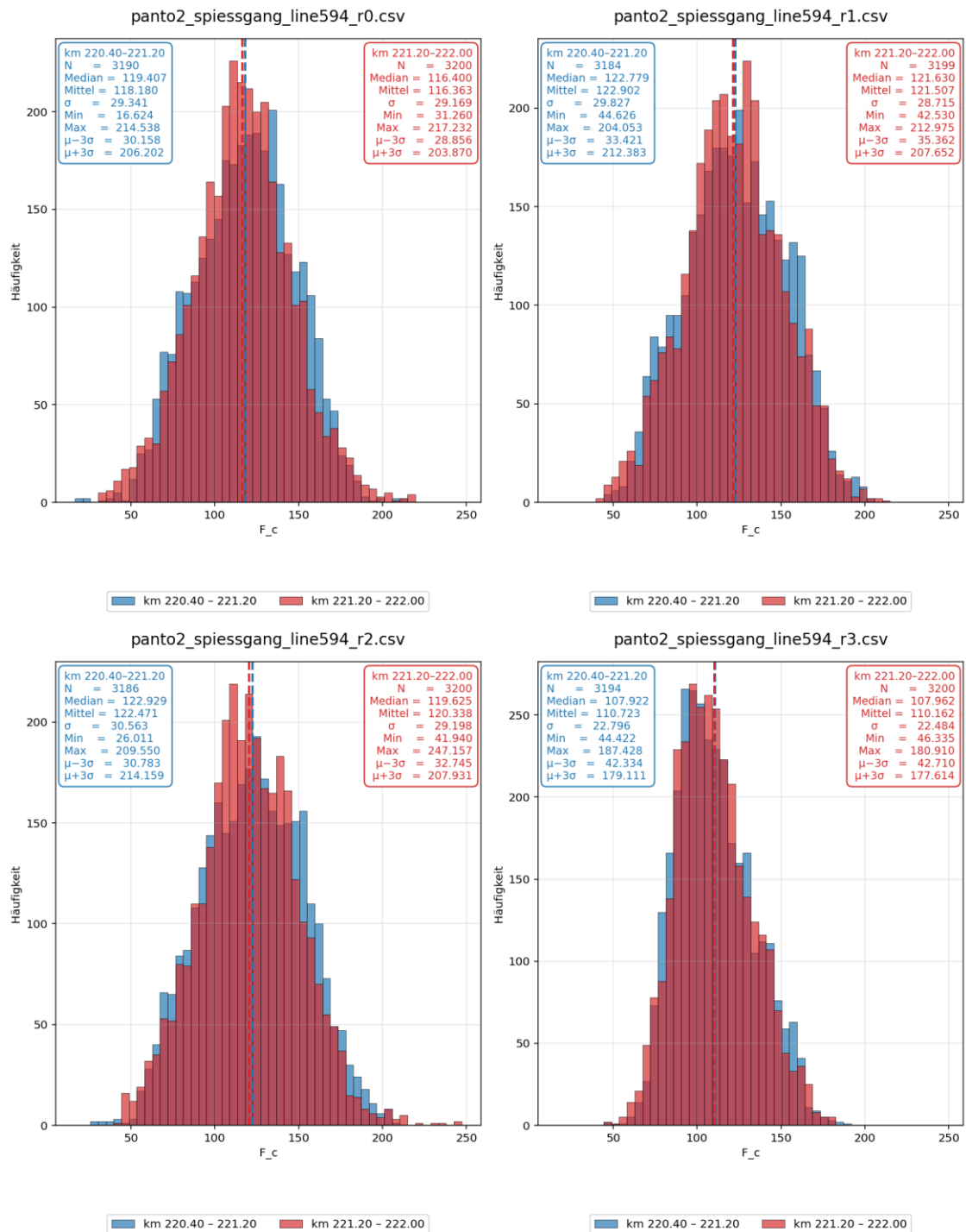


Abbildung 56: Messungen mit Stromabnehmer im Spiessgang r0, r1, r2 und r3: Histogramme der Kontaktkraft in den Linienkilometerbereichen 220,4 bis 221,2 und 221,2 bis 222

GBT Linie 594 - Histogramme Kraftmessungen in 2 Bereichen

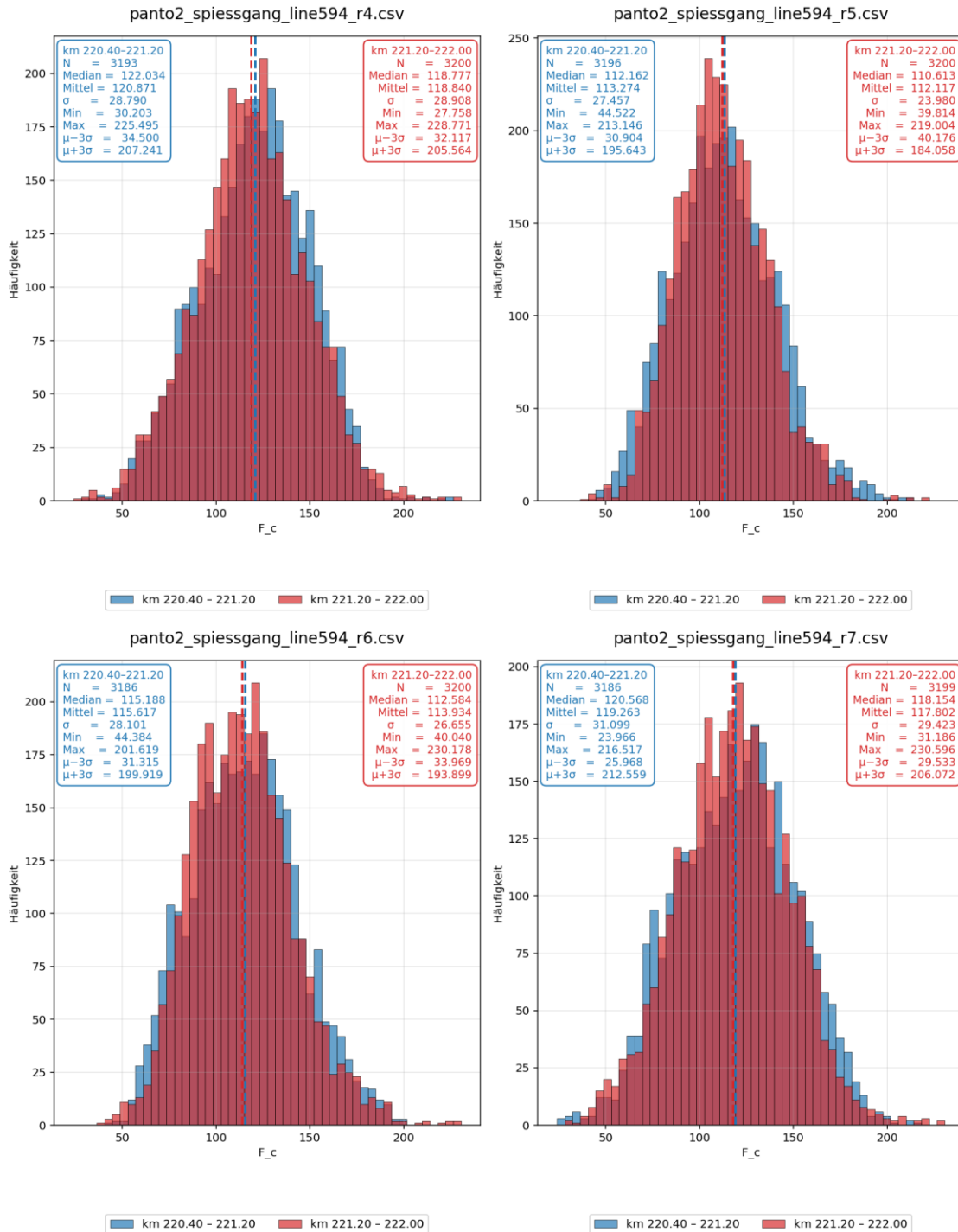


Abbildung 57: Messungen mit Stromabnehmer im Spiessgang r4, r5, r6 und r7: Histogramme der Kontaktkraft in den Linienkilometerbereichen 220,4 bis 221,2 und 221,2 bis 222

Analog zum Vergleich der Linienkilometerbereiche 220,4 bis 221,2 und 221,2 bis 222 werden die Linienkilometerbereiche 232,5 bis 232,9 und 232,9 bis 233,3 betrachtet und die Erläuterungen zu den grafischen Darstellungen gelten entsprechend. Abbildung 58 zeigt die Fahrdrabtrestdicken und die Kontaktkraft der exemplarischen Messung „panto2_spiessgang_kine594_r3.csv“ in den Linienkilometerbereichen 232,5 bis 232,9 und 232,9 bis 233,3 (Achsenbeschriftung data.lineoffset.1 bezeichnet den Linienkilometer). Im Linienkilometerbereich 232,5 bis 232,9 (blau hinterlegt) werden in Messungen aus zwei Jahren niedrigere Fahrdrabtrestdicken ermittelt als im Linienkilometerbereich 232,9 bis 233,3 (rot hinterlegt).

Analog zum Vergleich der Linienkilometerbereiche 220,4 bis 221,2 und 221,2 bis 222 kann keine Kontaktkraftmessung als Referenz bestimmt werden. Für alle 16 Kontaktkraftmessungen werden die Histogramme der Linienkilometerbereiche 232,5 bis 232,9 und 232,9 bis 233,3 gegenübergestellt, was in Abbildung 59 bis Abbildung 62 dargestellt ist. Der Vergleich dieser beiden Linienkilometerbereiche zeigt bei den Messungen im Kniegang r0, r1, r2, r3, r4 und r7 sowie im Spiessgang r7 keine deutlichen Unterschiede hinsichtlich Standardabweichung σ , statistischem Minimum $\mu-3\sigma$ und statistischem Maximum $\mu+3\sigma$ in den beiden Bereichen. Für die Messungen im Kniegang r5 und r6 sowie im Spiessgang r0 bis r6 zeigen sich im Linienkilometerbereich 232,5 bis 232,9 höhere Werte für σ und $\mu+3\sigma$ als im Linienkilometerbereich 232,9 bis 233,3. Für diese Messungen werden im Linienkilometerbereich 232,5 bis 232,9 geringere Werte für $\mu-3\sigma$ ermittelt als im Linienkilometerbereich 232,9 bis 233,3.

Bei einem Teil der Messungen werden im Bereich mit niedrigeren Fahrdrabtrestdicken höhere Streuungen, höhere statistische Maxima und niedrigere statistische Minima der Kontaktkraft gefunden.

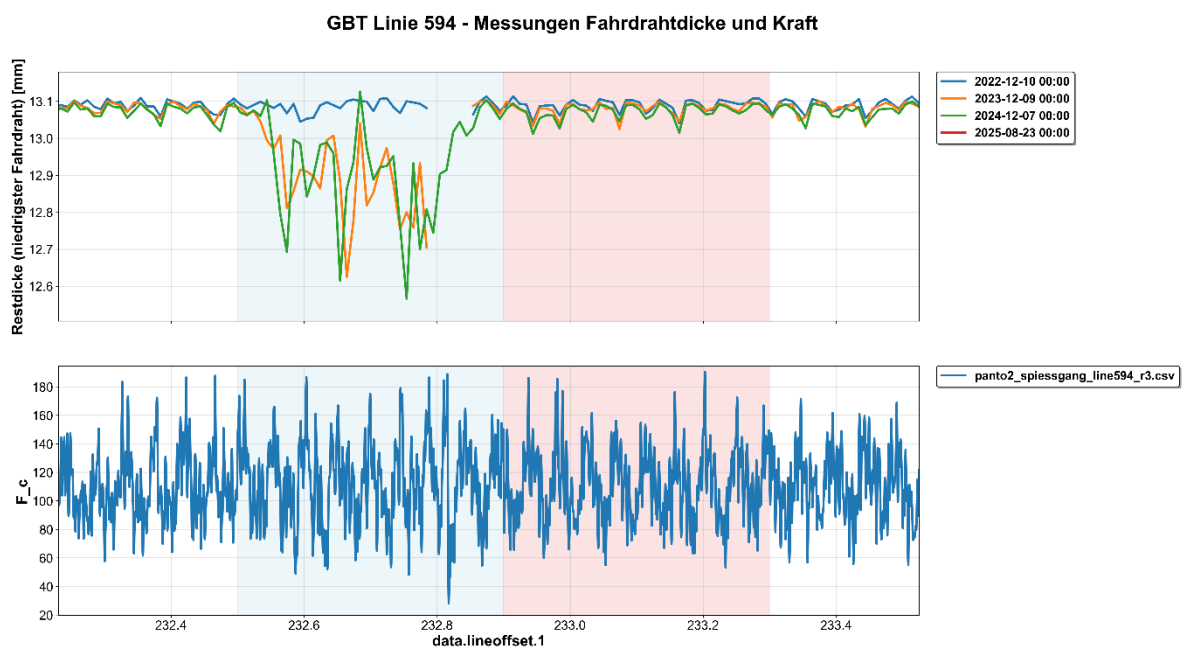


Abbildung 58: Vergleich Linienkilometer 232,5 bis 232,9 und Linienkilometer 232,9 bis 233,3 im GBT

GBT Linie 594 - Histogramme Kraftmessungen in 2 Bereichen

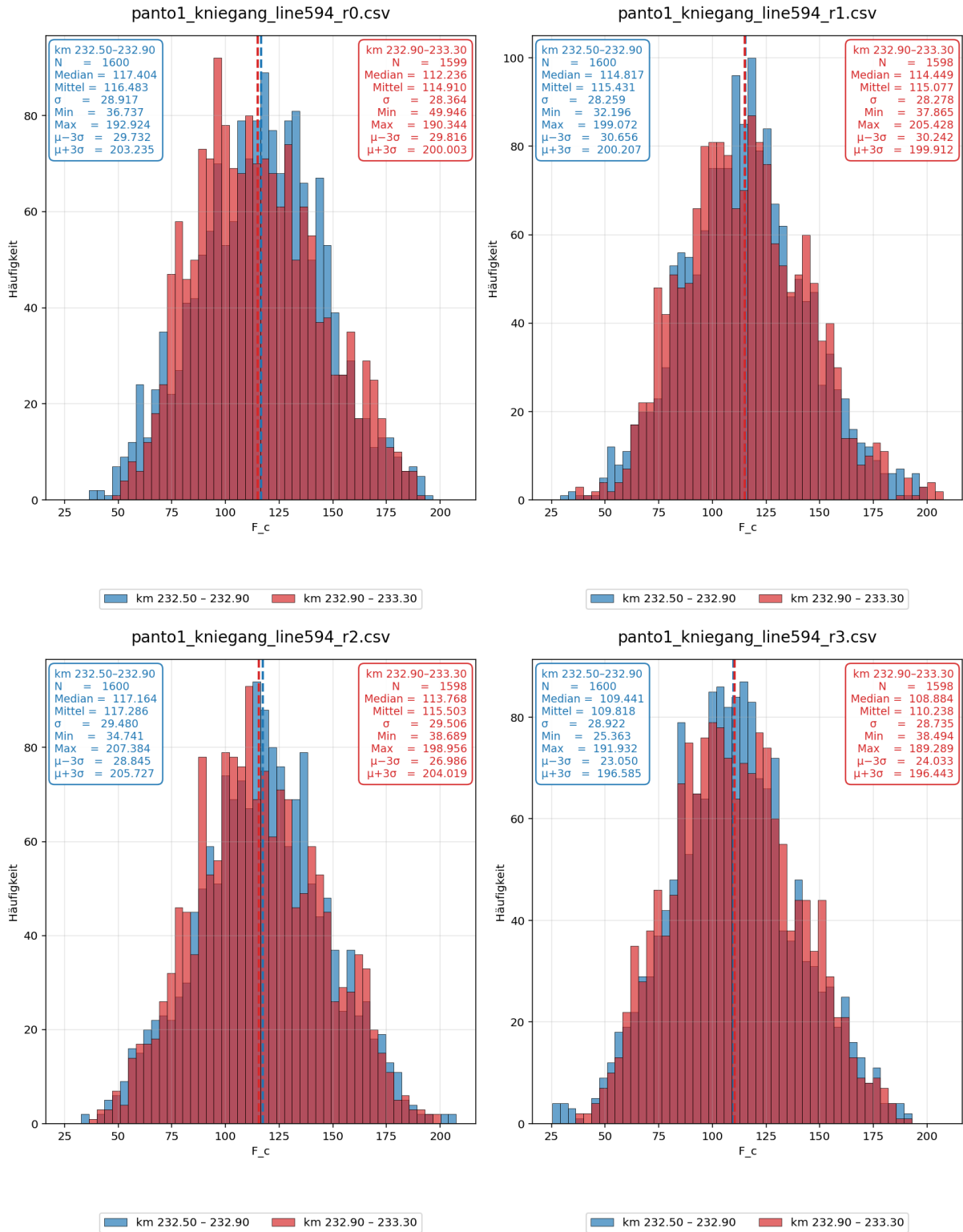


Abbildung 59: Messungen mit Stromabnehmer im Kniegang r0, r1, r2 und r3: Histogramme der Kontaktkraft in den Linienkilometerbereichen 232,5 bis 232,9 und 232,9 bis 233,3

GBT Linie 594 - Histogramme Kraftmessungen in 2 Bereichen

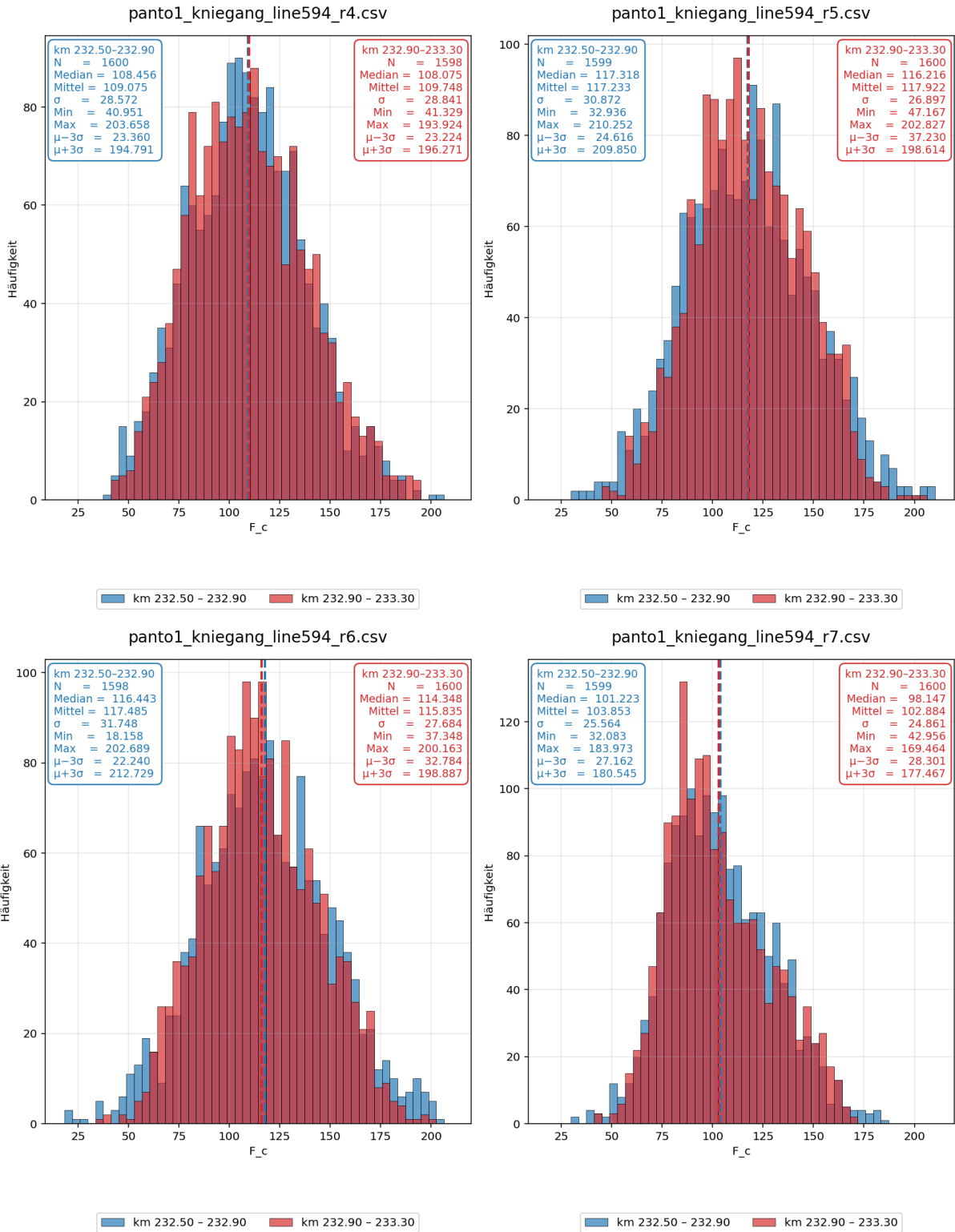


Abbildung 60: Messungen mit Stromabnehmer im Kniegang r4, r5, r6 und r7: Histogramme der Kontaktkraft in den Linienkilometerbereichen 232,5 bis 232,9 und 232,9 bis 233,3

GBT Linie 594 - Histogramme Kraftmessungen in 2 Bereichen

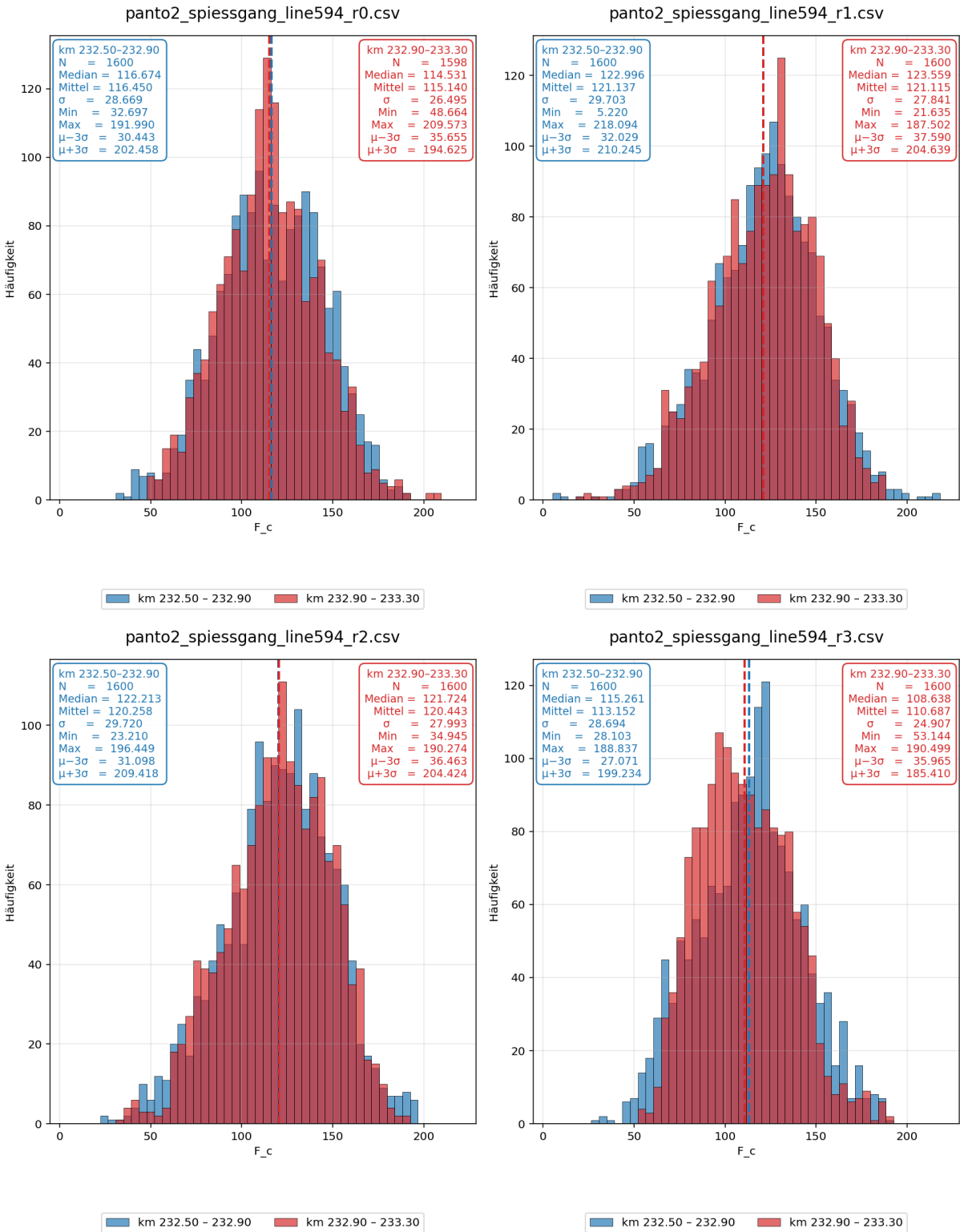


Abbildung 61: Messungen mit Stromabnehmer im Spiessgang r0, r1, r2 und r3: Histogramme der Kontaktkraft in den Linienkilometerbereichen 232,5 bis 232,9 und 232,9 bis 233,3

GBT Linie 594 - Histogramme Kraftmessungen in 2 Bereichen

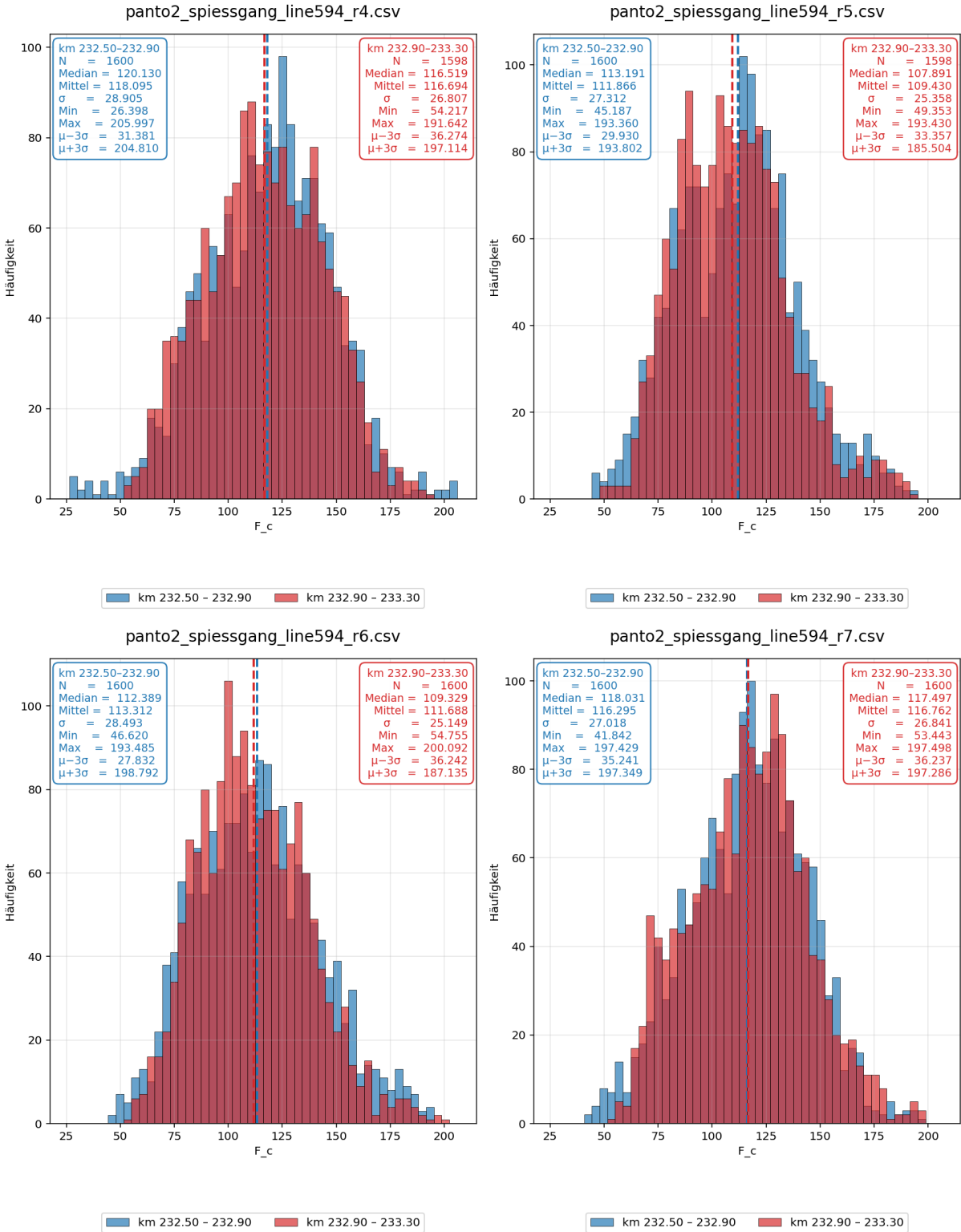


Abbildung 62: Messungen mit Stromabnehmer im Spiessgang r4, r5, r6 und r7: Histogramme der Kontaktkraft in den Linienkilometerbereichen 232,5 bis 232,9 und 232,9 bis 233,3

6.2 Fahrdrähtrestdicken im LBT

6.2.1 Grafische Darstellung der Fahrdrähtrestdicken im LBT

Für die Linie 330 des LBT liegen Messungen aus den Jahren 2021 bis 2025 vor, in denen Fahrdrähtrestdicken ermittelt wurden. Da in der Messung des Jahres 2025 die gleichen Werte enthalten sind wie in der Messung des Jahres 2024, wird die Messung des Jahres 2025 nicht weiter betrachtet. Die in Kapitel 6.1.1 genannten Erläuterungen zur Interpretation der Datenbasis und der Messunsicherheit gelten analog für die Betrachtung der Daten des LBT. Für den LBT wird von einem AC120 Fahrdraht mit initialem Durchmesser von 13,2 mm ausgegangen. Wie beim GBT beträgt der Abstand zwischen zwei Messorten rund zehn Meter.

Abbildung 63 zeigt einen Ausschnitt der in den Jahren 2021 bis 2024 ermittelten Fahrdrähtrestdicken im LBT (Linie 330). Zwischen den Linienkilometern 30 und 35 sind teilweise Fahrdrähtrestdicken größer 14 mm enthalten. Diese auffälligen Werte sind nicht plausibel, da sie größer als der angenommene initiale Durchmesser sind.

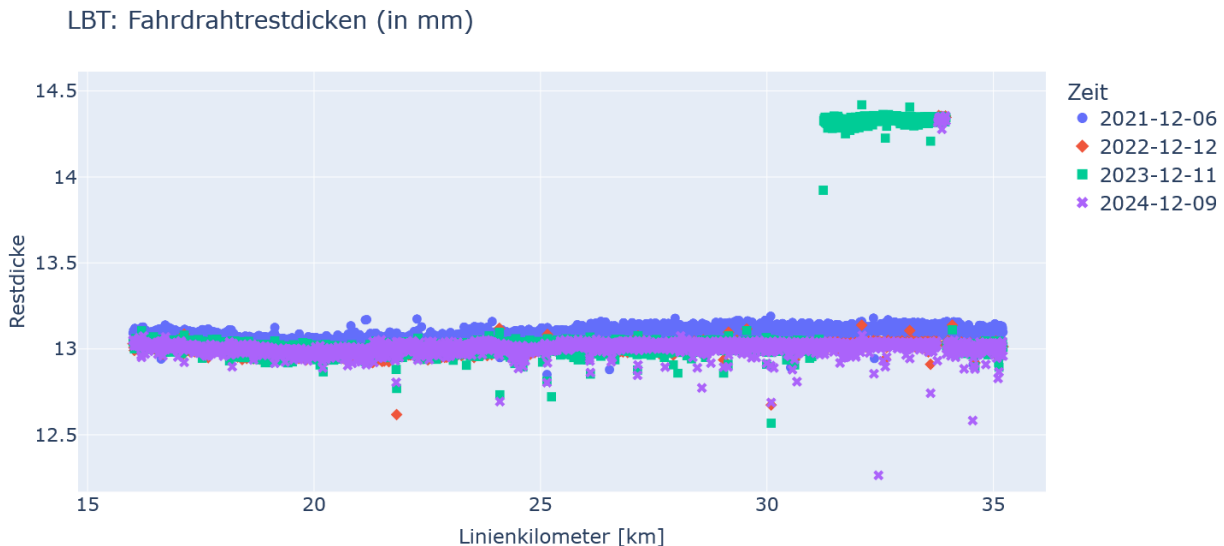


Abbildung 63: Fahrdrähtrestdicken im LBT (Linie 330)

Abbildung 64 zeigt einen Ausschnitt der Fahrdrähtrestdicken im LBT. Es ist zu sehen, dass unabhängig von der Messung die niedrigsten Fahrdrähtrestdicken mit größter Häufigkeit etwa bei Linienkilometer 20 auftreten.

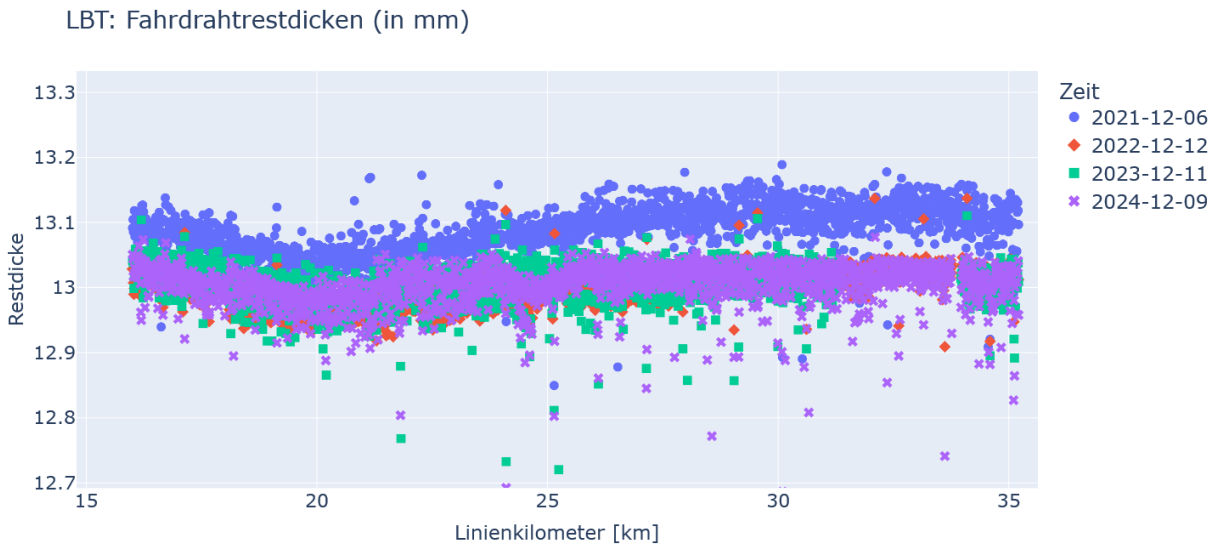


Abbildung 64: Ausschnitt der Fahrdrabtrestdicken im LBT (Linie 330)

Abbildung 65 zeigt einen detaillierteren Ausschnitt der Fahrdrabtrestdicken im LBT. Ein erwartetes monotonen Absinken der Fahrdrabtrestdicke mit zunehmender Zeit ist teilweise nicht gegeben. Ein solches teilweise unplausibles Zunehmen der Fahrdrabtrestdicke mit der Zeit tritt auch im GBT auf. Wie beim GBT wird eine Messunsicherheit der Fahrdrabtrestdicke von $\pm 0,2$ mm angenommen. Die Messunsicherheit ist ein möglicher Grund für ein Zunehmen der Fahrdrabtrestdicke mit der Zeit.

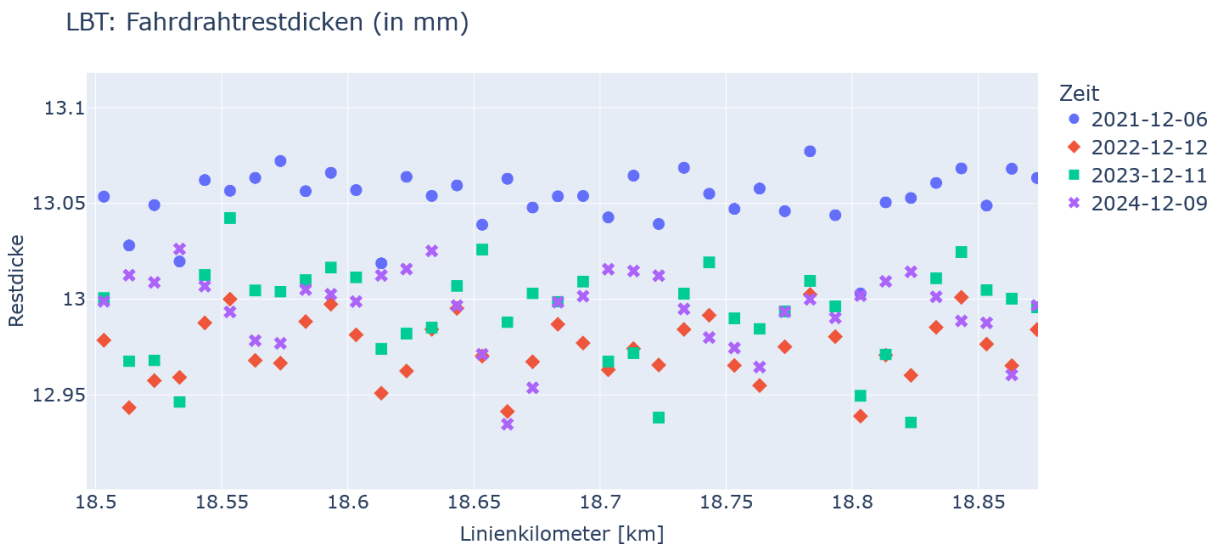


Abbildung 65: Ausschnitt der Fahrdrabtrestdicken im LBT (Linie 330) bei Linienkilometer 18,7

6.2.2 Tendenzielle Veränderung des Fahrdrabtquerschnitts im LBT

Das in Unterkapitel 6.1.2 dargestellte Vorgehen zur Ermittlung einer Tendenz für die Entwicklung der Verschleißfläche wird auch auf die Daten des LBT angewendet.

Eine detaillierte Dokumentation zu den ermittelten Werten der Größe „Restdicke (niedrigster Fahrdrabt) [mm]“ liegt nicht vor und es wird im Folgenden davon ausgegangen, dass diese Größe der Fahrdrabresthöhe h_{Re} aus Abbildung 47 entspricht. Des Weiteren wird für den LBT ein AC120 Fahrdrabt mit einer initialen unverschlissenen Querschnittsfläche von 120 mm^2 und einem initialen unverschlissenen Durchmesser von $13,2 \text{ mm}$ angenommen. Anhand von Gleichung (14) werden mit den Werten der Größe „Restdicke (niedrigster Fahrdrabt) [mm]“ und dem angenommenen initialen Durchmesser von $13,2 \text{ mm}$ Verschleißflächen berechnet.

Da auch für den LBT kein detailliertes Betriebsprogramm vorliegt, wird wie beim GBT eine Annahme bezüglich der Anzahl der Stromabnehmerdurchgänge getroffen. Analog zum Vorgehen beim GBT werden für den jeweiligen Linienkilometer die Verschleißflächen betrachtet, welche aus Messungen unterschiedlicher Zeitpunkte abgeleitet werden. Mit der Annahme von 5 Stromabnehmerdurchgängen pro Stunde kann den Verschleißflächen die Anzahl an Stromabnehmerdurchgängen seit der zeitlich ersten Messung zugewiesen werden. Abbildung 66 zeigt für den Linienkilometer 16,233279 des LBT die Verschleißflächen, die aus Messungen der Jahre 2021, 2022 und 2023 abgeleitet wurden. Dabei basiert der linke Punkt in der Abbildung auf der Messung aus 2021, der mittlere auf der Messung aus 2022 und der rechte auf der Messung aus 2023. Mit der Methode der kleinsten Quadrate wird die blaue Gerade in Abbildung 66 an die Punkte angepasst. Die Steigung der Geraden zeigt eine Zunahme der Verschleißfläche von $3,531 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^2$ pro Stromabnehmerdurchgang.

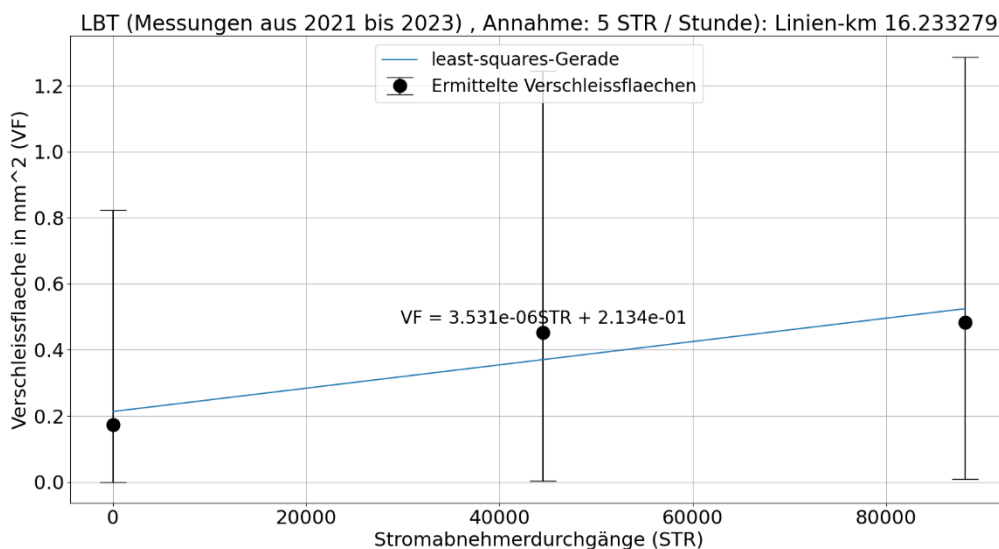


Abbildung 66: Zunahme der Verschleißfläche mit steigender Anzahl an Stromabnehmerdurchgängen (Annahme: 5 Stromabnehmerdurchgänge pro Stunde)

Die für Linienkilometer 16,233279 des LBT gezeigte Vorgehen zur Anpassung einer Gerade wird auch für die anderen Stellen im LBT mit Ausnahme des Bereiches von Linienkilometer 31,2 bis 34 durchgeführt. Zwischen Linienkilometer 31,2 und 34 sind teilweise unplausible Fahrdrastrestdicken größer 14 mm vorhanden (siehe Abbildung 63), weshalb der Bereich nicht miteinbezogen wird. In den Messungen aus den Jahren 2024 und 2025 sind die gleichen Werte für die Fahrdrastrestdicke enthalten, was auf eine fehlerhafte Zuordnung von Fahrdrastrestdicken und Jahr hindeutet. Es ist nicht klar, ob die Werte der Fahrdrastrestdicken im Jahr 2024 oder im Jahr 2025 ermittelt wurden, was eine Zuordnung von Stromabnehmerdurchgängen erschwert.

Für die Verschleißraten, die auf Basis von Messungen der Jahre 2021 bis 2023 ermittelt wurden, sind die Häufigkeiten in Abbildung 67 dargestellt. Das Histogramm ist so skaliert, dass die häufigsten Verschleißraten deutlich werden. Mit der Annahme von 5 Stromabnehmerdurchgängen pro Stunde wird die häufigste Verschleißrate bei circa $2,1 \cdot 10^{-6}$ mm² pro Stromabnehmerdurchgang ermittelt.

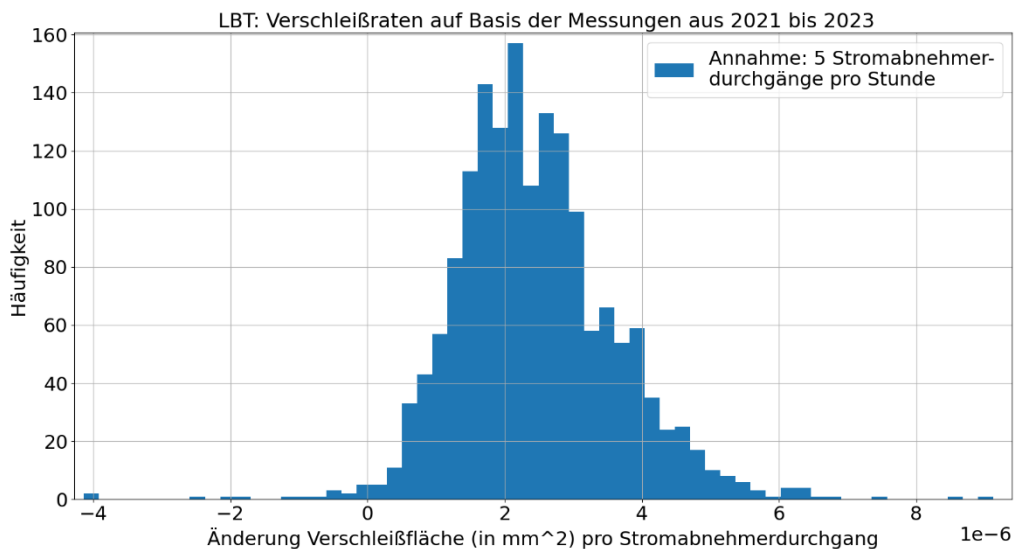


Abbildung 67: Histogramm der Verschleißraten im LBT auf Basis der Messungen der Jahre 2021 bis 2023, Annahme: 5 Stromabnehmerdurchgänge pro Stunde

Um die Sensitivität der Verschleißraten bezüglich der angenommenen Stromabnehmerdurchgänge einzuschätzen, wird das Vorgehen auch mit den Annahmen von 3 beziehungsweise 7 Stromabnehmerdurchgängen pro Stunde durchgeführt. Abbildung 68 zeigt das Histogramm der Verschleißraten, wenn 3 Stromabnehmerdurchgänge pro Stunde angenommen werden (Fokus auf Bereich mit größter Häufigkeit). In diesem Fall liegt die am häufigsten auftretende Verschleißrate bei circa $3,5 \cdot 10^{-6}$ mm² pro Stromabnehmerdurchgang.

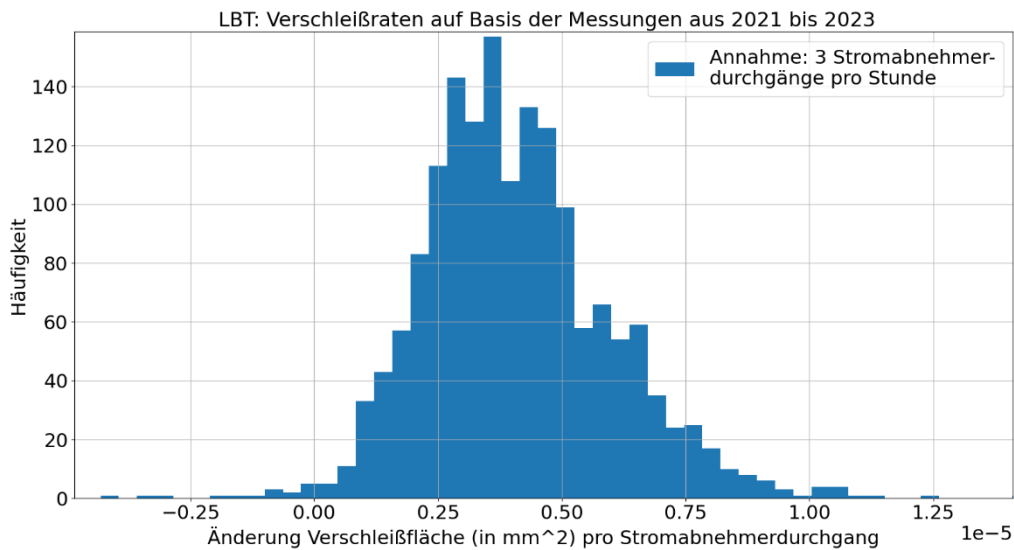


Abbildung 68: Histogramm der Verschleißraten im LBT auf Basis der Messungen der Jahre 2021 bis 2023, Annahme: 3 Stromabnehmerdurchgänge pro Stunde

Die Häufigkeiten der Verschleißraten unter der Annahme von 7 Stromabnehmerdurchgängen pro Stunde sind in Abbildung 69 enthalten (Fokus auf Bereich mit größter Häufigkeit). Die häufigste Verschleißrate wird bei circa $1,5 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^2$ pro Stromabnehmerdurchgang gefunden.

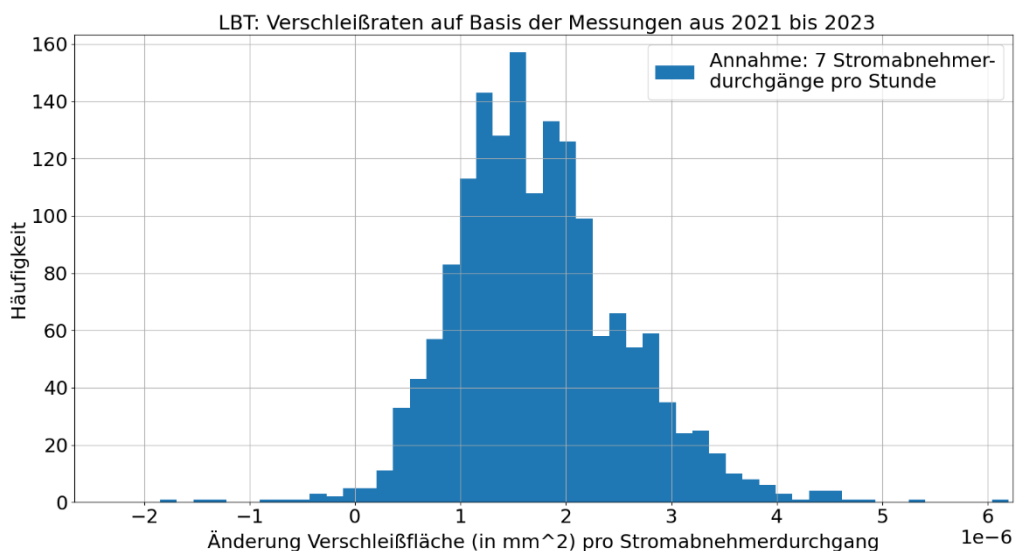


Abbildung 69: Histogramm der Verschleißraten im LBT auf Basis der Messungen der Jahre 2021 bis 2023, Annahme: 7 Stromabnehmerdurchgänge pro Stunde

Dieser Vergleich zeigt, die Abhängigkeit der Verschleißraten von der angenommenen Anzahl an Stromabnehmerdurchgängen. Wie beim GBT verdeutlicht dies die

Bedeutung eines Betriebsprogramms mit genauen Informationen bezüglich Stromabnehmerdurchgängen.

Um den Einfluss der Anzahl der betrachteten Messungen besser einschätzen zu können, wird das Vorgehen erneut unter Hinzuziehung der Messung aus 2024 durchgeführt. Es wird dafür angenommen, dass Werte der Fahrdratrestdicke am angegebenen Messdatum im Jahr 2024 ermittelt wurden. Damit kann die Verschleißgerade an einen zusätzlichen Punkt angepasst werden (vergleiche auch Abbildung 66 mit drei Punkten basierend auf Messungen der Jahre 2021 bis 2023). In Abbildung 70 ist das Histogramm der Verschleißraten basierend auf den Messungen der Jahre 2021 bis 2024 und der Annahme von 5 Stromabnehmerdurchgängen pro Stunde dargestellt. Die häufigsten Verschleißraten treten bei circa $1,2 \cdot 10^{-6}$ mm² pro Stromabnehmerdurchgang und $1,6 \cdot 10^{-6}$ mm² pro Stromabnehmerdurchgang auf. Diese häufigsten Verschleißraten auf Basis der Messungen der Jahre 2021 bis 2024 weichen von der häufigsten Verschleißrate auf Basis der Messungen der Jahre 2021 bis 2023 ab (in beiden Fällen 5 Stromabnehmerdurchgänge pro Stunde angenommen). Bei Einbeziehung der Messungen der Jahre 2021 bis 2023 liegt eine häufigste Verschleißrate von $2,1 \cdot 10^{-6}$ mm² pro Stromabnehmerdurchgang vor (vergleiche Abbildung 67). Damit wird der Einfluss der Anzahl der einbezogenen Messungen deutlich. Für aussagekräftigere Ergebnisse sollten in die Ermittlung der tendenziellen Veränderung des Fahrdratquerschnitts eine größere Zahl an Messungen aufgenommen werden.

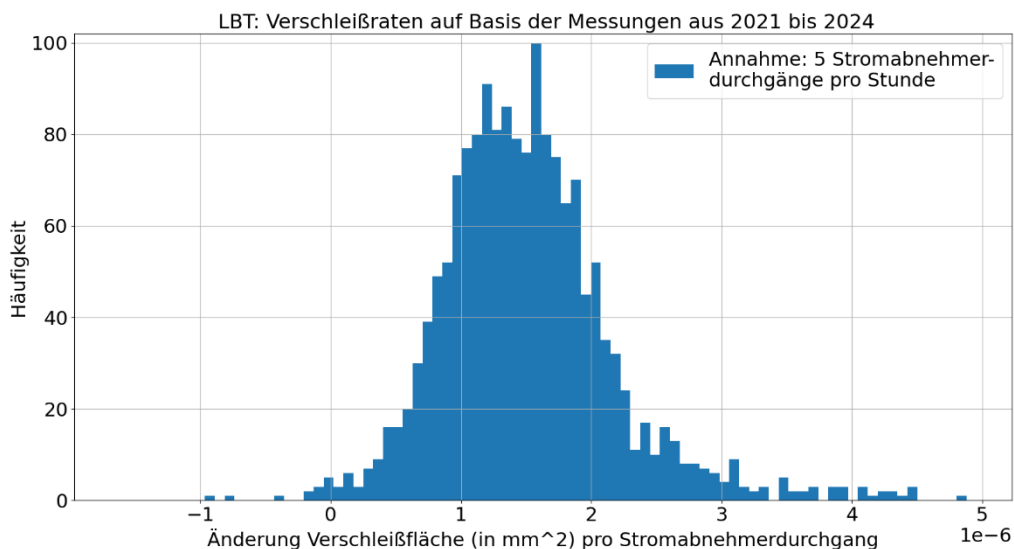


Abbildung 70: Histogramm der Verschleißraten im LBT auf Basis der Messungen der Jahre 2021 bis 2024, Annahme: 5 Stromabnehmerdurchgänge pro Stunde

Das in diesem Unterkapitel vorgestellte Vorgehen zeigt einen Ansatz, um eine Tendenz bezüglich der Änderung der Verschleißfläche des Fahrdrattes auf Basis von Messungen der Jahre 2021 bis 2023 beziehungsweise 2024 abzuleiten. Die erhaltenen Ergebnisse sind nicht statistisch gesichert, sondern lediglich auf Annahmen beruhende Tendenzen, weshalb sie für Prognosen von Verschleiß oder Lebensdauer

des Fahrdrahtes nicht geeignet sind. Die hohe Messunsicherheit, die niedrige örtliche Auflösung und die geringe Anzahl der Messungen der Fahrdrahtrestdicken sowie die nur auf Annahmen basierende Anzahl an Stromabnehmerdurchgängen verhindern valide, statistisch gesicherte Ergebnisse.

Im Rahmen dieser Betrachtung wurden nur Messungen aus drei beziehungsweise vier Jahren miteinbezogen und die Fahrdrahtrestdicken, auf denen die Verschleißflächen basieren, weisen eine hohe Unsicherheit auf. Eine weitere Einschränkung der Aussagekraft ist durch die niedrige örtliche Auflösung der Fahrdrahtrestdicken (Werte im Abstand von rund 10 Meter) gegeben. Dadurch ist es möglich, dass verschleißintensive Stellen (zum Beispiel bei Stützpunkten oder bei Massenanhäufungen) oftmals nicht von den Orten der Fahrdrahtuntersuchungen erfasst werden. Ein detailliertes Betriebsprogramm mit genauen Informationen bezüglich Stromabnehmerdurchgängen liegt nicht vor, weshalb für die Anzahl an Stromabnehmerdurchgängen Annahmen getroffen werden. Ein Vergleich der Ergebnisse bei Annahmen von 3, 5 und 7 Stromabnehmerdurchgängen pro Stunde zeigt den Einfluss auf die resultierenden Verschleißraten.

Um die Validität der Ergebnisse zu erhöhen, ist eine Einbeziehung von mehr Messungen sinnvoll. Somit kann die Verschleißgerade an eine größere Anzahl an Datenpunkten angepasst werden. Die Zunahme der Messung des Jahres 2024 in die Ermittlung einer Tendenz bezüglich der Änderung der Verschleißfläche des Fahrdrahtes verändert die Ergebnisse. Zudem lassen sich durch Nutzung genauer Informationen zu den Stromabnehmerdurchgängen anstelle von Annahmen Unsicherheiten hinsichtlich der Anzahl an Stromabnehmerdurchgängen reduzieren.

Die Untersuchungen des Fahrdrahtes mit einer höheren örtlichen Auflösung durchzuführen, kann eventuell mehr verschleißintensive Stellen erfassen. Eine Gegenüberstellung der ermittelten Fahrdrahtrestdicken des gleichen Abschnitts bei höherer und niedrigerer örtlicher Auflösung kann bei der Einschätzung des Einflusses der örtlichen Auflösung auf die Ergebnisse helfen.

Die für GBT und LBT ermittelten Tendenzen bezüglich der Änderung der Verschleißfläche des Fahrdrahtes basieren auf unterschiedlichen Anzahlen von Messungen. Dies stellt eine weitere Einschränkung für die Vergleichbarkeit der Tendenzen für GBT und LBT dar.

Im Vergleich zum GBT zeigen die ermittelten Tendenzen für den LBT bei gleichen angenommenen Stromabnehmerdurchgängen pro Stunde größere Werte bezüglich der häufigsten Änderung der Verschleißfläche des Fahrdrahtes. Die auf Basis von Messungen der Jahre 2021 bis 2023 und der Annahme von 5 Stromabnehmerdurchgängen pro Stunde häufigste Verschleißrate liegt für den LBT bei circa $2,1 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^2$ pro Stromabnehmerdurchgang, was kleiner als eine in der Literatur gefundene Verschleißrate von 8 mm^2 pro 10^6 Stromabnehmerdurchgängen ist. Wie beim GBT ist die Validität der für den LBT erhaltenen Tendenzen zu hinterfragen.

Die hohe Messunsicherheit, die niedrige örtliche Auflösung und die geringe Anzahl der Messungen der Fahrdrahtrestdicken sowie die nur auf Annahmen basierende Anzahl an Stromabnehmerdurchgängen verhindern valide, statistisch gesicherte Ergebnisse für LBT und GBT.

Dennoch lässt sich aus den vorangegangenen Auswertungen folgende begründete Hypothese aufstellen: Die spezifischen Verschleißwerte der Fahrdrähte im GBT und LBT liegen selbst bei Ansatz geringerer Anzahl Stromabnehmerdurchgänge deutlich unter den aus der Literatur bekannten und durch Betriebsmessungen bestätigten Verschleißraten im Bereich von $4 \dots 8 \text{ mm}^2 / 10^6 \text{ STR}$ vergleichbarer Fahrdrähte. Bei Variation der angesetzten Zugzahlen ergeben sich aus den vorliegenden Messdaten aus GBT und LBT Verschleißraten im Bereich von minimal 1 bis $4 \text{ mm}^2 / 10^6 \text{ STR}$. Das legt die Schlussfolgerung nahe, dass die Fahrdrähte in LBT und GBT unter deren spezifischen Randbedingungen (Bauart der Oberleitung, Umgebungsbedingungen, Höchstgeschwindigkeit, Kontaktkraftverteilungen) weniger verschleifen als die Fahrdrähte der Referenzanwendungen. Damit bestehen größere Lebensdauerreserven.

7 Zusammenfassung

7.1 Harmonisierung von Kontaktkraftgrenzwerten

Die Güte der Energieübertragung auf elektrische Schienenfahrzeuge ist wesentlich geprägt durch die dynamische Interaktion zwischen Oberleitung und Stromabnehmer. Quantitativ beschrieben wird sie durch die wirkende Kontaktkraft und dem sich einstellenden Fahrdrahtanhub. Für beide Größen legen die Infrastrukturbetreiber in ihren Netzzugangsbedingungen Grenzwerte fest, die im Rahmen von Zulassungsfahrten nachzuweisen sind. Dies führt dazu, dass bei Neuzulassung eines Schienenfahrzeuges Einzelnachweise auf verschiedenen Referenzstrecken und mit teilweise voneinander abweichenden Grenzwerten durchgeführt werden. Diesem Umstand soll mit einer Harmonisierung der Zulassungsbedingungen entgegengewirkt werden, speziell für die Befahrung in den beiden Tunnelstrecken Lötschberg-Basis-Tunnel (LBT) und Gotthard-Basis-Tunnel (GBT).

Hierzu untersucht die vorliegende Studie die technische Machbarkeit einer Grenzwertanpassung. Im Detail lautet die Aufgabenstellung: Welche Auswirkung hat eine Anhebung der Kontaktkraftgrenzwerte des LBT auf die des GBT hinsichtlich Betriebssicherheit und Lebensdauer der Fahrleitung?

Kern der untersuchten Grenzwerte ist die mittlere Kontaktkraft F_m . Der Grenzwert im LBT liegt bei derzeit 120 N und soll auf 130 N (Grenzwert im GBT) angehoben werden. Verbunden wird damit eine verbesserte Kontaktierung bei höheren Fahrgeschwindigkeiten und eine stabilere Stromübertragung von der Fahrleitung auf das Fahrzeug. Durch die Reduktion von Kontaktverlusten entstehen weniger Lichtbögen, welche die beiden Kontaktpartner nachhaltig beschädigen können. Gleichzeitig erzeugt ein höherer Anpressdruck aber auch eine stärkere mechanische Belastung. Das Risiko eines unzulässigen Verschleißes von Fahrdraht und Schleifleiste des Stromabnehmers intensiviert sich. Weiterhin kann eine stärkere Anregung der schwingungsfähigen Oberleitung zu Dynamiken führen, die weitere Bewertungsgrößen wie maximale Kontaktkraft F_{max} oder die Standardabweichung der Kontaktkraft σ unzulässig erhöhen. Zwischen diesen technischen Aspekten ist eine Abwägung vorzunehmen.

7.2 Konstruktive Parameter und dynamische Kennwerte der Oberleitungen

Die beiden Bauwerke LBT und GBT sind mit unterschiedlichen Oberleitungen ausgestattet. Beide sind zwar in ihrem Aufbau als Kettenwerksfahrleitung ähnlich, z. B. weisen sie beide kein Y-Beiseil auf, doch wurden wesentliche Auslegungsparameter anders gewählt. Die Oberleitungsbauarten Re 250 LBL-T II (LBT) und R 250 GBT basieren auf der deutschen Bauart Re 250. Für die GBT-Oberleitung wurden darüber hinaus Erfahrungen aus der deutschen Bauart Re 330 herangezogen. Die Oberleitungen von LBT und GBT verwenden gleiche Material- und Querschnittspaarungen: Fahrdraht RiS 120 mm², das Tragseil Bz II 70 mm² und die Hänger Bz II 10 mm². Die Tragseile werden mit 15 kN getrennt vom Fahrdraht nachgespannt. Im GBT wird der Fahrdraht mit 17 kN etwas stärker nachgespannt als der Fahrdraht, der mit 15 kN fixiert wird. Im LBT werden beide Seile mit 15 kN abgespannt. Die schmalen Tunnelquerschnittsflächen erzwingen eine begrenzte Systemhöhe von 0,9 m (GBT) bzw. 1,3 m (LBT) der Fahrleitungen. Mit größeren Systemhöhen sind

tendenziell günstigere Schwingungseigenschaften verbunden. Beispielsweise ist die Standardabweichung der Kontaktkraft niedriger. Insgesamt hat die Systemhöhe zwar eine geringe Sensitivität, jedoch können niedrige Systemhöhen die Extrema der Kontaktkraft verstärken. Die Regelspannweite ist in beiden Tunneln ähnlich groß und beträgt 48 m (GBT) bzw. 50 m (LBT). Im GBT wird auf einen Vordurchhang des Fahrdrahtes verzichtet. Hingegen beträgt dieser im LBT 0,6 ‰ der Längsspannweite. Der Vordurchhang wirkt dem Elastizitätsunterschied zum Stützpunkt entgegen, vor allem bei Oberleitungen ohne Y-Beiseil und soll die Befahrgüte verbessern. Der Einfluss auf die Kontaktkraft selbst ist gering. Die unterschiedlichen Abspannkräfte und Längsspannweiten führen zu verschiedenen rechnerischen Elastizitäten in Feldmitte von 0,375 mm/N (GBT) bzw. 0,425 mm/N (LBT). Also etwas höheren Fahrdraht-anhuben in Feldmitte bei gleicher Kontaktkraftbelastung durch den Stromabnehmer.

Allein aus der Wahl der konstruktiven Parameter heraus lässt sich das dynamische Verhalten der beiden Oberleitungstypen miteinander kaum objektiv vergleichen. Auch ist eine qualitative Aussage über die Befahrgüte hinsichtlich Kontaktkraft und Anhub über die obigen Anmerkungen hinaus praktisch nicht möglich.

Bessere Vergleiche lassen sich mithilfe dynamischer Kennwerte für die beiden Oberleitungen erzielen. Diese berechnen sich mithilfe der konstruktiven Parameter. Ausgewertete Kenngrößen sind Wellenausbreitungsgeschwindigkeit, Reflexionsfaktor, Dopplerfaktor, Verstärkungsfaktor, Grenzgeschwindigkeit und Eigenfrequenz.

Die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit im GBT (453,6 km/h) ist aufgrund der höheren Nachspannkraft im Fahrdraht etwas höher als im LBT (426,2 km/h). Nach EN 50119 sollte die maximale Fahrgeschwindigkeit nicht größer als 70% der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit betragen. Für beide Tunnel wird diese normative Anforderung eingehalten.

Ebenfalls bedingt durch die stärkere Nachspannkraft variieren die Reflexionsfaktoren für GBT (0,413) und LBT (0,428). Damit verbunden ist ein leicht höheres Risiko für einknickende Hänger im LBT. Der Dopplerfaktor charakterisiert eine Erhöhung der Kontaktkraft am bewegten Stromabnehmer aufgrund einer reflektierten Transversalwelle und ist im GBT (0,29) etwas höher als im LBT (0,26). Das Verhältnis von Reflexionsfaktor zu Dopplerfaktor wird als Verstärkungsfaktor bezeichnet. Er ist für beide Tunnel größer eins (GBT: 1,426; LBT: 1,643), was zu einer verstärkenden Kraftwirkung am Stromabnehmer führt. Dennoch liegt er unterhalb des Erfahrungswertes für einen zuverlässigen Betrieb von 2,5. Die Grenzgeschwindigkeit beschreibt die maximale Geschwindigkeit, bei welcher keine Verstärkung der Kraft eintritt. Sie ist mit 188,6 km/h im GBT 18 km/h größer als im LBT (170,6 km/h).

Die (niedrigste) Eigenfrequenz der antimetrischen Schwingung (Schwingungsknoten in Symmetrieachse) beträgt für den GBT 1,44 Hz und den LBT 1,34 Hz. Die Eigenfrequenz der symmetrischen Schwingung (Schwingungsbauch in Symmetrieachse) liegt für den GBT bei 1,37 Hz und den LBT bei 1,31 Hz.

Die dynamischen Kennwerte der Oberleitungen in GBT und LBT sind insgesamt ähnlich groß. Dies lässt vermuten, dass sich beide Fahrleitungen unter Krafteinwirkung auch ähnlich verhalten werden. Im Detail lassen die Kennwerte aber keine eindeutigen Rückschlüsse zu, welche Oberleitung sich hinsichtlich Kontaktkraftverlauf und Fahrdrahtanhub günstiger verhalten wird. Zumal dies auch wesentlich durch das

Eigenschwingverhalten der Stromabnehmer und des Abstandes untereinander beeinflusst wird.

Zusammenfassend zeigt sich, dass sowohl die konstruktiven Parameter als auch die daraus abgeleiteten dynamischen Kennwerte der Oberleitungen in LBT und GBT ähnlich sind. Im Detail aber, wurden die Oberleitungen an die spezifischen Einsatzbedingungen angepasst. Beispielsweise erfordert das größere Versperrungsmaß (aufgrund des kleineren Tunnelquerschnittes) im GBT höhere Fahrdratzugkräfte, um die ungünstigere Aerodynamik auszugleichen. Die Wahl der konstruktiven Parameter und die berechneten dynamischen Kennwerte lassen vermuten, dass die Betriebserfahrungen aus dem LBT in die Dimensionierung der Oberleitung im GBT mit eingeflossen sind. Dadurch wurde eine etwas höhere Befahrgeschwindigkeit als im LBT im aktuellen Betrieb möglich, wenngleich beide Fahrleitungen für eine maximale Geschwindigkeit von 250 km/h dimensioniert sind.

7.3 Kontaktkraftmessung und Dynamiksimulation

Der initiale Systemvergleich der beiden Oberleitungssysteme wird durch die Auswertung von Kontaktkraftmessungen und Dynamiksimulationen der Interaktion Stromabnehmer und Fahrdratz vertieft.

Auswertungen von Seilmessungen am Stromabnehmer zeigen, dass die aerodynamischen Kräfte in den beiden Tunneln meist ähnlich hoch sind, tendenziell im GBT etwas größer als im LBT. Vor allem aber wird deutlich, wie wesentlich die Gangart eines Pantographen ist. So sind die Unterschiede bezüglich der Tunnel (LBT oder GBT) deutlich kleiner als die ermittelten Unterschiede hinsichtlich der Gangart (Spieß oder Knie). Vergleicht man einzelne Messzüge miteinander, so sind deutliche Unterschiede erkennbar: Abhängig vom Stromabnehmertyp (Richard, Stemmann, Schunk, Faiveley), -richtung (Knie, Spieß) und dessen Positionierung im Zugverband, der Fahrzeugkonfiguration (Einfach- oder Doppeltraktion, Lok/HGV, Wagen) und Tunnel (LBT, GBT) variiert die aerodynamische Kraft von wenigen Newton bis zu über 100 Newton zusätzlichem Auftrieb.

Die beispielhafte Auswertung von Seilkraft- und Kontaktkraftmessungen für zwei Zugkonfigurationen zeigt keinen direkten Zusammenhang zwischen der aerodynamischen Kraftkomponente und der mittleren Kontaktkraft. Tendenziell steigt zwar das dynamische Kontaktkraftniveau mit stärkerem Auftrieb, aber nicht in dem Maße wie es die Seilkräfte anzeigen.

Alle ausgewerteten Kontaktkraftmessungen zeigen eine charakteristische Grundschwingung, welche von höherfrequenten Schwingungen überlagert wird. Diese Basisschwingung ist unabhängig von der Fahrgeschwindigkeit sowie der Stromabnehmerichtung. Sie muss also durch den Aufbau der Oberleitung bestimmt sein. Die Kontaktkraftschwingung pendelt zwischen annähernd ortsfesten lokalen Extrempunkten hin und her. Globale Extremstellen treten vor allem an besonderen massereichen Stellen im Kettenwerk wie Festpunkten oder Überlappungen auf.

Aus der Betriebserfahrung heraus ist bekannt, dass die mittlere Kontaktkraft aufgrund der aerodynamischen Kraftkomponente der Kontaktkraft vom Quadrat der Geschwindigkeit abhängt. Höhere zulässige mittlere Kontaktkräfte führen erwartbar auch zu höheren Kontaktkraftextrema. Bei den Minima ist das unschädlich, solange es

zu keinem Kontaktabriss kommt, bei den Maxima kann dies aber zur Überschreitung zulässiger Grenzwerte führen. In den einzelnen ausgewerteten Messdaten konnte ein linearer Zusammenhang zwischen mittlerer und maximaler Kontaktkraft ermittelt. Je nach Fahrtrichtung sind diese verschieden stark ausgeprägt, im LBT etwas höher als im GBT.

Die Standardabweichung der Kontaktkraft σ ist abhängig von der Ausführung der Oberleitung (LBT oder GBT) und der Fahrgeschwindigkeit. Bei höheren Fahrgeschwindigkeiten steigt sie signifikant an. Im GBT etwas eher (180 km/h) als im LBT (200 km/h). Der Einfluss der mittleren Kontaktkraft ist deutlich kleiner als der Einfluss der Fahrgeschwindigkeit.

Zusätzlich zur Messauswertung wurden eine Vielzahl an Dynamiksimulationen durchgeführt und diese umfassend analysiert. Untersucht wurde eine Erhöhung der mittleren Kontaktkraft von 120 N auf 130 N, was den jeweils aktuellen Grenzwerten für die mittlere Kontaktkraft in LBT und GBT entspricht. Erwartungsgemäß verstärkt diese Erhöhung die dynamische Beanspruchung von Oberleitung und Stromabnehmer. Deutlich sichtbar ist dies in der berechneten Kontaktkraft sowie des Fahrdrahtanhubes.

Die Erhöhung der mittleren Kontaktkraft erhöht gleichzeitig die Kontaktkraftextrema F_{\max} und F_{\min} , die Standardabweichung der Kontaktkraft σ sowie den maximalen Fahrdrahtanhub am Stützpunkt. Im LBT sind die Kontaktkräfte etwas höher als beim GBT, hingegen ist im GBT der Fahrdrahtanhub etwas höher als im LBT.

Die höchsten Belastungen und damit kritischsten Fälle traten in Mehrfachtraktion auf. Ob am führenden oder nachlaufenden Stromabnehmer ist abhängig vom Abstand der Stromabnehmer sowie der Tunneloberleitung.

Alle Simulationen wurden mit einer einheitlichen Fahrgeschwindigkeit von 200 km/h durchgeführt. Es ist bereits aus verschiedenen Publikationen zur Mehrfachtraktion bekannt, dass auch bei geringeren Befahrgeschwindigkeiten erhöhte Kontaktkräfte sowie stärkere Fahrdrahtanhübe auftreten können. Verstärkt wird dieser Effekt mit steigender Stromabnehmeranzahl. In späteren Untersuchungen zur Harmonisierung der Zulassungsbedingungen in LBT und GBT sollte dieser Aspekt näher betrachtet werden, um den relevanten Betriebsbereich abzudecken.

Einflüsse der konstruktiv abweichenden Parameter der Oberleitung in LBT und GBT auf das dynamische Verhalten sind vorhanden und mit den Simulationsergebnissen quantitativ darstellbar.

Insgesamt ist das dynamische Verhalten von Oberleitung und Stromabnehmer in den beiden Tunneln ähnlich und zeigt keine großen „Ausreißer“. Vielmehr sind Zugkonfiguration, Stromabnehmerposition und Fahrtrichtung (Spieß- oder Kniegang des Stromabnehmers) wichtige Einflussparameter, die manchmal auch gegenläufige Tendenzen erzeugen (z. B. maximale Belastung bei kurzer oder langer Stromabnehmerdistanz).

Vergleicht man die Simulationsergebnisse mit den bestehenden Grenzwerten für Kontaktkraft, Standardabweichung der Kontaktkraft und Fahrdrahtanhub des GBT als höchstzulässige Bewertungsgröße, so werden diese in allen untersuchten Varianten nicht überschritten. **Insofern ist die Erhöhung der mittleren Kontaktkraft für die Betriebssicherheit nicht kritisch.**

7.4 Fahrdrabtverschleiß unter Krafteinwirkung

In der Fachliteratur finden sich verschiedene Untersuchungen zum Verschleiß von Fahrdrähten bei Belastung durch einen mechanischen Reibakteur. Sie unterscheiden sich hinsichtlich der Materialpaarung von Stromabnehmerschleifleiste und Fahrdraht aber auch in der angewandten Methodik. So existieren einige Laborversuche aber auch vereinzelt Realmessungen an ausgewählten Elementen der Oberleitungen. Die Auswertungen der Veröffentlichungen zeigen, dass der Verschleiß durch lokale Spitzen in der Kontaktkraft entsteht, nicht jedoch durch die mittlere Kontaktkraft.

Eine Korrelation zwischen mittlerer Kontaktkraft und Kontaktkraftspitzen existiert und wurde durch Messdatenauswertung und im Rahmen der Simulationsrechnungen untersucht (vgl. Kapitel 7.3). Aus den durchgeführten Simulationen zu LBT und GBT ist ableitbar, wie sich die dynamische Beanspruchung in den lebensdauerrelevanten Verschleißbereichen verhält.

Eine exakte, wissenschaftlich fundierte und belastbare Prognose der Fahrdrabt-lebensdauer in Abhängigkeit des zulässigen mittleren Kontaktniveaus ist nicht möglich. Aus den langjährigen Erfahrungen und Messwerten zur Thematik ist jedoch die örtliche und zeitliche Dimension des Verschleißproblems gut ableitbar. Lebensdauerrelevanter Fahrdrabtverschleiß ist ein lokales Phänomen an konkreten konstruktiven Baugruppen. Valide spezifische Verschleißwerte liegen bei vergleichbaren Oberleitungskonstruktionen mit CuAg-Fahrdrähten im Bereich von 4 ... 8 mm² pro 10⁶-Stromabnehmerdurchgängen. Messungen zum Fahrdrabtverschleiß in LBT und GBT zeigen deutlich geringere spezifische Verschleißraten (1 ... 4 mm² pro 10⁶-Stromabnehmerdurchgänge) bei einer angenommenen Anzahl von 5 Stromabnehmern pro Stunde. Mögliche Ursache ist hierbei die Lage der Oberleitungen in Tunneln, welche beständige äußere Umwelteinflüsse (Temperatur, Feuchtigkeit) bieten. Außerdem könnte das angenommene Betriebsprogramm zu hoch angesetzt sein oder die Messunsicherheit die Ergebnisse überlagern.

Die Lebensdauererwartung für typische Verschleißstellen beträgt mindestens viele 10 bis weit über 200 Jahre hinaus. **Damit besteht keine Sicherheitsrelevanz für den Betrieb.**

7.5 Handlungsempfehlungen

Auf Basis der umfangreichen Recherchen, Berechnungen und Auswertungen werden folgende Empfehlungen gegeben.

Empfehlung 1: Harmonisierung der zulässigen mittleren Kontaktkraftwerte unter Beibehaltung der zulässigen Maximalwerte

Der Kontaktkraftmittelwert stellt selbst kein sicherheitsrelevantes Kriterium dar, solange die geltenden Kontaktkraftgrenzwerte (Minimum, Maximum, Standardabweichung der Kontaktkraft) eingehalten werden. Eine Anhebung des zulässigen Kontaktkraftmittelwertes von 120 N auf 130 N hat nur minimale Auswirkungen auf den Fahrdrabtverschleiß. Die prognostizierte Lebensdauer von Fahrleitungen beträgt bis weit über 150 Jahre. Auch die kritischsten Verschleißstellen in der Oberleitung (Fahrdrabtkreuzungen) haben eine Lebensdauererwartung von mindestens 10 Jahren. Da die Erhöhung der mittleren Kontaktkraft nicht zu einer deutlichen Reduktion dieser Dauer führt, besteht für den Betrieb keine Sicherheitsrelevanz. Die geltenden Kontaktkraftgrenzwerte für beide Tunnel können perspektivisch in Richtung des höheren zulässigen Kontaktkraftmittelwertes (des GBT) harmonisiert werden.

Empfehlung 2: Nochmalige Dynamik-Messfahrten mit identischer Fahrzeugkonfiguration und Fahrgeschwindigkeit in beiden Tunneln

Simulationen und Betriebserfahrungen zeigen, dass die dynamischen Beanspruchungen der Oberleitung unter Mehrfachstromabnehmerbetrieb sich von denen unter Einfachtraktion unterscheiden. Bisher fehlt eine objektive Vergleichsgrundlage, um die Interaktion in beiden Tunneln miteinander vergleichen zu können. Daher sind geeignete Messkampagnen durchzuführen. Wichtig ist, dass gleiche Randbedingungen wie Stromabnehmerrichtung (Spieß oder Knie), und -abstand sowie Fahrgeschwindigkeit berücksichtigt werden. Die Messungen sollten hinsichtlich der Verteilungsparameter und der Orte maximaler Kontaktkräfte miteinander verglichen werden. Weiterhin sollte eine Begleitung durch parallele Simulationen erfolgen. Die Ergebnisse von Messungen und parallelen Dynamiksimulationen können dann im Rahmen der Harmonisierung bei der Aufstellung von Messprogrammen und Simulationsuntersuchungen berücksichtigt werden. Zum Beispiel in Form von reduzierten Anforderungen in der Nachweisführung.

Empfehlung 3: Langzeit-Messung der Fahrdrabtstärke in identifizierten relevanten Problembereichen

Vorhandene Fahrdrabtdickemessungen von LBT und GBT sind zeitlich und örtlich lückenhaft. Sie weisen teilweise unplausible Sprünge auf und sollten aktualisiert werden. Vor allem die identifizierten Verschleißstellen sollten nach Angleichung der Kontaktkraftgrenzwerte in LBT und GBT zunächst intensiver als bisher inspiziert werden. Im Bereich der Verschleißstellen muss in dichterem Raster (bisher alle 10 Meter) gemessen werden. Dies dient der Gewinnung verlässlicher Vergleichsdaten zur begleitenden Instandhaltung und Gewährleistung eines sicheren und zuverlässigen Bahnbetriebs - auch unter höherer Beanspruchung als bisher.

8 Literaturverzeichnis

- [1] R. Puschmann, A. Schmieder, A. Dölling, W. Braun, F. Mielsch, M. Altmann und H. Ullmann, Fahrleitungen elektrischer Bahnen - Planung, Berechnung, Ausführung, Betrieb, Stamsried: Druck + Verlag Ernst Vögel, 2024.
- [2] P. Huber, „Der Einbau der Bahntechnik im Gotthard-Basistunnel,“ *Eisenbahntechnische Rundschau*, Bd. 69, pp. 59-64, December 2020.
- [3] M. Solka und M. Kuhn, „Fertigstellung der Oberleitung im Gotthard-Basistunnel,“ *Elektrische Bahnen*, Bd. 113, p. 128–135, 2015.
- [4] D. Behrends, J. Heland, W. Krötz, M. Dumitra, M. Flückinger, D. Höregott, W. Kapfenberger, N. Steinmann, G. van Kalsbeek, U. Wili und O. Wüest, „Stromabnahme unter dem Einfluss der Aerodynamik im Tunnel - Auswirkungen auf die Gestaltung der Infrastruktur und der Stromabnehmer,“ *Elektrische Bahnen*, Bd. 115, Nr. 2-3, pp. 70-81, 2017.
- [5] D. Obieray, „Feste Fahrbahn im längsten Eisenbahntunnel der Welt - dem Gotthard Basistunnel,“ January 2017. [Online]. Available: https://www.beton.org/fileadmin/beton-org/media/Service/Update/BETO_update_47_de_DE_170117_ES_Web.pdf.
- [6] B. Baumgartner und M. Lörtscher, „Inbetriebnahme des Lötschberg-Basistunnels (LBT),“ *Elektrische Bahnen*, p. 345–349, 2007.
- [7] G. Hahn, „Oberleitungstechnische Ausrüstung des Lötschberg-Basistunnels,“ *Elektrische Bahnen*, Bd. 105, p. 284–289, 2007.
- [8] M. Schweller, B. Hagenah, M. Lörtscher, O. Wüest und R. Matthes, „Aerodynamische Bedingungen im einspurigen Lötschberg-Basistunnel,“ *Elektrische Bahnen*, Bd. 105, Nr. 11, pp. 592-602, 2007.
- [9] M. Solka und D. Behrends, „Oberleitung im Gotthard-Basistunnel – Zwischenprüfbescheinigung nach TSI Energie,“ *Elektrische Bahnen*, Bd. 114, p. 376, 2016.
- [10] M. Kuhn und M. Solka, „Oberleitungsanlagen im Gotthard-Basistunnel,“ *Elektrische Bahnen*, Bd. 111, p. 430–439, 2013.
- [11] W. Kapfenberger, M. Flückiger, U. Wili, J. Heland, M. Dumitra, W. Krötz und D. Höregott, „Aerodynamik an Stromabnehmern in kleinen Tunnelquerschnitten – Problem für schnellfahrende Züge?,“ *Elektrische Bahnen*, 2015.
- [12] M. Beitelschmidt, S. Noack, J. Hietzge und E. Brandes, Schwingungsverhalten der Oberleitung bei mehreren Stromabnehmern, Deutsches Zentrum für Schienenverkehrsforschung beim Eisenbahn-Bundesamt, 2024.
- [13] F. Pintscher, *Kontaktvorgänge und Verschleißverhalten des systems Fahrdrabt - Schleifleiste (Dissertation, TU Dresden)*, Dresden, 2003.

- [14] S. Terfloth, *Dissertation - Instandhaltungsoptimierte Nahverkehrsoberleitungen*, Dresden, 2021.
- [15] T. Bregulla, F. Aufschläger, A. Stephan, F. Pupke und T. Nickel, „Statistische Auswertung des Verschleißes von Fahrdrähten unterschiedlicher Werkstoffe,“ *Elektrische Bahnen*, Bd. 119, Nr. 7-8, pp. 282 - 290, 2021.
- [16] E. Helwig, A. Stephan und F. Pupke, „Lebenszykluskosten von Fahrdrähten – Grundlagen und erste Ergebnisse,“ *Elektrische Bahnen*, Nr. 4, pp. 188 - 195, 2016.
- [17] T. Bregulla, L. Wottke und U. Resch, *Methoden und Erkenntnisse zur Fahrdrähtlebensdauer (Vortrag auf ÖVG Kongress)*, Wien, 2024.
- [18] S. Terfloth, *Interner Projektbericht der Professur für Elektrische Bahnen (TU Dresden) zum ENUBA-Projekt*.
- [19] R. Puschmann und C. Kaschky, „Fahrdrähtverschleiß auf Hochgeschwindigkeitsstrecken,“ *Elektrische Bahnen*, Nr. 2-3, pp. 86 - 97, 2019.
- [20] F. Kießling, R. Puschmann, A. Schmieder und P. Schmidt, *Fahrleitungen elektrischer Bahnen (2. Auflage)*, 1998.
- [21] H. Borgwardt, „Verschleißverhalten des Fahrdrähtes der Regeloberleitungen der Deutschen Bundesbahn,“ *Elektrische Bahnen*, Nr. 10, pp. 287 - 295, 1989.
- [22] J. Hauben und D. Vandepitte, „Relating non-normality in the contact force distribution from measurements to physical phenomena in the dynamic contact between pantograph and overhead contact line in high speed railway infrastruactu,“ in *Proceedings of ISMA2016 including USD2016*, 2016.
- [23] S. Besier, „Tragseillose Oberleitungen im Stadtverkehr? – Teil 2,“ *Elektrische Bahnen*, Nr. 6, pp. 257 - 266, 2009.
- [24] K. Becker, U. Resch, A. Rukwied und B. Zweig, „Lebensdauermodellierung von Oberleitungen,“ *Elektrische Bahnen*, Bd. 94, pp. 329-336, 1996.
- [25] G. Auditeau, S. Avronsart, C. Coutois und W. Krötz, „Carbon contact strip materials - Testing of wear,“ *Elektrische Bahnen*, Nr. 3, pp. 186-195, 2013.
- [26] G. Bucca und A. Collina, „Electromechanical interaction between carbon-based pantograph strip and copper contact wire: A heuristic wear model,“ *Tribology International*, pp. 47-56, 2015.
- [27] R. Puschmann, A. Schmieder, A. Dölling, W. Braun, F. Mielsch, M. Altmann und H. Ullmann, *Fahrleitungen elektrischer Bahnen*, 4 Hrsg., 2024.
- [28] D. Behrends, M. Dumitra, M. Flückiger, J. Heland, D. Höregott, W. Kapfenberger, W. Krötz, N. Steinmann, G. van Kalsbeek, U. Wili und O. Wüest, „Stromabnahme unter dem Einfluss der Aerodynamik im Tunnel – Auswirkungen auf die Gestaltung der Infrastruktur und der Stromabnehmer,“ *Elektrische Bahnen*, Bd. 115, p. 70, 2017.

- [29] M. Lörtscher, J. Fehlbaum, P. Furrer, H. Glanzmann, M. Jordi, P. Keller, M. Märki, B. Muff, H. Schippel und T. Suter, „Elektrische Ausrüstung des Lötschberg-Basistunnels (LBT),“ *Elektrische Bahnen*, p. 323, 2007.